

Входит в перечень ведущих научных журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы основные
результаты диссертаций на соискание ученой степени
доктора и кандидата наук, утвержденный экспертными
советами Высшей аттестационной комиссии
Министерства образования и науки РФ

Иркутский государственный университет путей сообщения • Irkutsk State Transport University • Иркутский государственный университет путей сообщения



Иркутский государственный университет путей сообщения • Irkutsk State Transport University • Иркутский государственный университет путей сообщения

Подписной индекс
в каталоге «Урал-Пресс» – 64556

Зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Современные технологии.
Системный анализ. Моделирование

2025 № 2(86)

Modern technologies.
System analysis. Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)

Современные технологии системный анализ Моделирование

2025
№ 2 (86)

Иркутский государственный
университет путей сообщения

Машиностроение • Транспортные системы • Информационные технологии

Machine Building • Transport Systems • Information Technology



Modern technologies system analysis Modeling

2025
No. 2 (86)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№2 (86)
2 0 2 5

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **Ю.А. Трофимов**
Ответственный за выпуск **И.Ю. Ермоленко**

Приоритетные цели журнала

- передача знаний и опыта, накопленного мировым сообществом и научными школами университета;
- выработка новых знаний в области механики, машиностроения, информатики и транспорта для решения актуальных проблем современной техники;
- ознакомление читателей с передовым мировым опытом внедрения научных разработок по техническим наукам.

Стратегические задачи

- предоставлять ученым возможность публиковать результаты своих исследований;
- привлекать внимание к наиболее актуальным перспективным и интересным направлениям научных исследований по тематике журнала;
- обмен мнениями между исследователями из разных регионов и государств.

Учредитель и издатель

Иркутский государственный университет путей сообщения
(664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)

Главный редактор

Ю.А. Трофимов, канд. техн. наук, доц., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

Заместители главного редактора

Е.Ю. Дульский, д-р техн. наук, доц., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

И.Ю. Ермоленко, канд. техн. наук, доц., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

Редакционный совет

В.А. Анисимов, д-р техн. наук, доц., Петербургский государственный университет путей сообщения (г. Санкт-Петербург, РФ)

С.А. Бессоненко, д-р техн. наук, проф., Сибирский государственный университет путей сообщения (г. Новосибирск, РФ)

И.В. Бычков, д-р техн. наук, академик РАН, проф., Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения РАН (г. Иркутск, РФ)

В.Е. Гозбенко, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

А.Л. Казаков, д-р физ.-мат. наук, проф. РАН, Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения РАН (г. Иркутск, РФ)

Ю.М. Краковский, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

А.В. Крюков, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

Н.А. Махутов, д-р техн. наук, член-корреспондент РАН, проф., Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (г. Москва, РФ)

В.В. Москвичев, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, Красноярский филиал - специальное конструкторско-технологическое бюро "Наука" ФИЦ ИВЦ (г. Красноярск, РФ)

А.В. Мурыгин, д-р техн. наук, проф., Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва (г. Красноярск, РФ)

Н.С. Нестерова, д-р техн. наук, доц., Дальневосточный государственный университет путей сообщения (г. Хабаровск, РФ)

С.И. Носков, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

С.М. Овчаренко, д-р техн. наук, проф., Омский государственный университет путей сообщения (г. Омск, РФ)

В.А. Подвербный, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

Р. Энхбат, д-р физ.-мат. наук, проф., Монгольский национальный университет (г. Улан-Батор, Монголия)

Здислав Якиевич, д-р техн. наук, проф., Университет штата Аризона (США)

А.С. Янюшкин, д-р техн. наук, проф., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (г. Чебоксары, РФ)

Адрес редакции: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

Телефон: +7(3952) 63-83-74

e-mail: stsam@irgups.ru

Сайт: <http://stsam.irgups.ru> (<http://ojs.irgups.ru/index.php/stsam>)

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Подписной индекс в каталоге «Урал-Пресс» – 64556.

Включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ); Ulrich's Periodicals Directory; ВИНТИ РАН.

Входит в перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный экспертными советами Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования РФ по группам научных специальностей: машиностроение; транспортные системы.

Modern technologies System analysis Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)
2025
No. 2 (86)
Founded in 2004
Published quarterly

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

Aims and Scope

- transfer of knowledge and experience gained by the world community and schools of thought of the university;
- development of new knowledge in the field of mechanics; mechanical engineering; computer science; transport to solve topical problems of modern technology;
- acquaint the readers with the world's best practices in the implementation of scientific developments in technical sciences.

Strategic objectives

- provide scientists with an opportunity to publish the results of their researches;
- attract attention to the most relevant and promising areas of research on the subject of the journal;
- exchange of opinions between researchers from different regions and states.

Founder and publisher

Irkutsk State Transport University
(15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russian Federation)

Editor-in-Chief

Yu.A. Trofimov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Prof, Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

Deputy Editor-in-Chief

E.Yu. Dul'skii, D.Sc. in Engineering, Associate Prof, Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

I.Yu. Ermolenko, Ph.D. in Engineering Science, Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

Editorial council

V.A. Anisimov, D.Sc. in Engineering, Associate Prof., Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Saint Petersburg, Russian Federation)

S.A. Bessonenko, D.Sc. in Engineering, Associate Prof., Siberian Transport University (Novosibirsk, Russian Federation)

I.V. Bychkov, D.Sc. in Engineering, Academician of RAS, Prof., Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of RAS (Irkutsk, Russian Federation)

V.E. Gozbenko, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

A.L. Kazakov, D.Sc. in Physics and Mathematics, Prof. RAS, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of RAS (Irkutsk, Russian Federation)

Yu.M. Krakovskiy, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

A.V. Kryukov, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

N.A. Makhutov, D.Sc. in Engineering, Prof., corresponding member of the RAS, Prof., Mechanical Engineering Research Institute of the RAS (Moscow, Russian Federation)

V.V. Moskvichyov, D.Sc. in Engineering, Prof., Krasnoyarsk Branch Office of the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS (Krasnoyarsk, Russian Federation)

A.V. Murygin, D.Sc. in Engineering, Prof., Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies (Krasnoyarsk, Russian Federation)

N.S. Nesterova, D.Sc. in Engineering, Associate Prof., Far Eastern State Transport University (Khabarovsk, Russian Federation)

S.I. Noskov, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

S.M. Ovcharenko, D.Sc. in Engineering, Prof., Omsk State Transport University (Omsk, Russian Federation)

V.A. Podverbny, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

R. Enkhbat, D.Sc. in Physics and Mathematics, Prof., Mathematics of National University of Mongolia (Ulaanbaatar, Mongolia)

Zdislav Yakievich, D.Sc. in Engineering, Prof., Arizona State University (USA)

A.S. Yanyushkin, D.Sc. in Engineering, Prof., Ulyanov Chuvash State University (Cheboksary, Russian Federation)

Адрес редакции: 15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russia Federation

Tel.: +7(3952) 63-83-74

e-mail: stsam@irgups.ru

Web-Site: <http://stsam.irgups.ru> (<http://ojs.irgups.ru/index.php/stsam>)

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications. Registration Certificate ПИ № ФС77-66109 от June 20, 2016

The subscription index in the Russian catalogue «Ural-Press» is 64556.

Has been included in the Russian Science Citation Index (RSCI); Ulrich's Periodicals Directory.

The journal is included in the list of leading scholarly journals

and editions in which the main results of dissertations for the scientific degree of a doctor and candidate of sciences, approved by the expert councils of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for groups of scientific specialties:

- Mechanical engineering;
- Transport systems.

СОДЕРЖАНИЕ

Транспортные системы

Бардушко А.Ю., Крапивин М.И., Пузина Е.Ю. Комплексная методика диагностирования фарфоровых покрышек электрооборудования и опорно-стержневых изоляторов	10
Ковригина И.В., Большаков Р.С. Разработка лабораторного стенда для исследования нагруженности буксового узла	24
Кожевников В.В. Обзор совмещенного движения на высокоскоростных железнодорожных магистралях: мировой и российский опыт	35
Власова Н.В. Сценарии развития транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД» с целью выявления рисков и эффективности планирования транспортно-логистических услуг	49
Рябченко Н.Л., Астраханцев Л.А., Тихомиров В.А., Немыкина В.В. Повышение устойчивости и совершенствование функциональных свойств электромеханической системы вспомогательных машин электровоза	61
Пятков Д.А., Курочкин В.А., Жестовский А.Н. Реконструкция шпалопропиточного завода на Красноярской железной дороге: технические аспекты	74
Асалханова Т.Н., Осколков А.А. Достоверность реализованной предиктивной аналитики состояния железнодорожного пути в ОАО «РЖД», направления по совершенствованию предиктивного анализа	84
Оленцевич В.А. Моделирование работы локомотивного комплекса станции стыкования разных систем тока с учетом прироста пропускной и перерабатывающей мощностей для пропуска перспективного поездопотока на инфраструктуре Восточного полигона железных дорог	100

Информационные технологии

- Гнатив Д.М., Комаров А.С., Арестов О.В.** Расчет напряженно-деформированного состояния днищевой секции судна-снабженца при кантовке в процессе изготовления с использованием программы «ЛИРА» 120
- Краковский Ю.М., Киргизбаев В.П.** Сравнительный анализ показателей эффективности в виде рисков при проведении работ по устранению инцидентов информационной безопасности 131
- Белоголов Ю.И.** Расчет седла клапана, нагруженного герметизирующим усилием и давлением рабочей среды 145

CONTENTS

Transport Systems

Bardushko A.Yu., Krapivin M.I., Puzina E.Yu. Comprehensive diagnostic technique for porcelain covers of electrical equipment and support-rod insulators	10
Kovrigina I.V., Bol'shakov R.S. Designing of the laboratory stand for the research of axle box loading	24
Kozhevnikov V.V. Review of mixed traffic on high-speed rail lines: global and Russian experience	35
Vlasova N.V. Development scenarios for the transport and logistics business of the Russian Railways holding company aimed at identifying risks and the effectiveness of planning transport and logistics services	49
Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Nemykina V.V. Increasing the stability and improving the functional properties of the electromechanical system of auxiliary machines of an electric locomotive	61
Pyatkov D.A., Kurochkin V.A., Zhestovskii A.N. Reconstruction of the sleeper plant on the Krasnoyarsk railway: technical aspects	74
Asalkhanova T.N., Oskolkov A.A. Reliability of the implemented predictive analytics of the state of the railway track in JSC Russian Railways, directions for improving the predictive analysis	84
Olentsevich V.A. Modeling the operation of the locomotive complex of the docking station of different current systems, taking into account the increase in throughput and processing capacities for the passage of prospective train traffic on the Eastern Railway polygon infrastructure	100

Information Technology

D.M. Gnativ, A.S. Komarov, O.V. Arestov Calculation of the stress-strain state of the bottom section of the supply vessel during edging in the process of manufacturing using the program «LIRA»	120
Krakovskii Yu.M., Kirgizbaev V.P. Comparative Analysis of Risk-Based Performance Indicators in Information Security Incident Remediation	131
Belogolov Yu. I. Calculation of a valve seat loaded with sealing force and working medium pressure	145

Требования к статьям, принимаемым к публикации

Рукописи статей представляются в электронном и распечатанном виде.

Рекомендуемый объем статей 9-12 стр.

1. К статье прилагается:

- акт экспертизы;
- заявка на опубликование (от каждого автора).

2. Статья включает в себя:

- индекс УДК;
- сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, полное название учреждения (кафедры), контактный телефон и E-mail;
- аннотация (реферат) к статье должна быть (на русском и английском языках): информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); компактной (укладываться в объем от 180 до 250 слов).
- ключевые слова (5-10 ключевых слов на русском и английском языках);
- библиографический список (необходимо упоминание не менее 18 источников, в том числе 25% на зарубежные источники). Библиографический список к статье оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Текст статьи предоставляется в виде файла с расширением *.doc – документа, построенного средствами Microsoft Word, и распечаткой на стандартных листах формата А4 (210x297 мм) в две колонки, заверенной подписью авторов.

Статья должна быть **структурирована** (введение, 2 и более пункта разделов, заключение).

3. При наборе статьи в Microsoft Word с учетом формата издания рекомендуются следующие установки:

- параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2,5 см; слева и справа – 1,75 см; табуляция – 1 см; ориентация – книжная;
- шрифт – Times New Roman, размер – 11, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- текст статьи разбивается в две колонки с помощью команды "Форматирование -> Колонки" со следующими параметрами: ширина колонки: 8,5 см, промежуток: 0,5 см.

При вставке формул использовать только Microsoft Equation 3 с параметрами:

- элементы формулы для греческих букв и символов шрифт Symbol, для остальных элементов – шрифт Times New Roman (использование букв русского алфавита в формуле нежелательно);
- размер символов: обычный – 10 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 11 пт. Все экспликации элементов формул в тексте также необходимо выполнять в виде формул.

Рисунки, вставленные в текст статьи, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм, представлены в виде файла с расширением *.jpg, *.tif и распечаткой на стандартных листах формата А4, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров.

В журнал **не принимаются** статьи с таблицами, развернутыми по вертикали (альбомная ориентация), а также имеющими аббревиатуры в названии и аннотации. Если по тексту статьи не делаются ссылки на номера формул, то формулы не нумеруются.

Статьи, представляемые в журнал, проходят обязательное рецензирование.

Самоцитирование журнала в статьях **запрещено**.

Пример оформления статьи представлен на сайте журнала: <http://stsam.ircups.ru> (<http://ojs.ircups.ru/index.php/stsam>)

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Редакция оставляет за собой право отклонить статью, не отвечающую указанным требованиям или не прошедшую обязательное рецензирование.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения. Аудитория В-203. Каимов Евгений Витальевич.

Телефон: 8(3952) 63-83-57. Факс: 8(3952) 38-76-72. E-mail: stsam@ircups.ru

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

TRANSPORT SYSTEMS

Комплексная методика диагностирования фарфоровых покрышек электрооборудования и опорно-стержневых изоляторов

А.Ю. Бардушко, М.И. Крапивин, Е.Ю. Пузина✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉lena-rus05@mail.ru

Резюме

Поддержание надежного состояния фарфоровой изоляции является ключевым фактором в обеспечении бесперебойной работы электроустановок. Недостаточное финансирование в последние 10–15 лет привело к увеличению числа отказов оборудования в системах электроснабжения. Старение и износ фарфоровых изоляторов без своевременной диагностики и обслуживания могут привести к серьезным авариям. Традиционные методы контроля, такие как визуальный осмотр и измерение сопротивления изоляции, не всегда позволяют выявить скрытые дефекты, особенно в условиях эксплуатации под напряжением. В этой связи актуальными становятся неразрушающие методы диагностики, помогающие оценивать функционал изоляторов без их демонтажа. Состояние изоляции напрямую зависит от срока ее службы и качества проводимой диагностики, поэтому необходимо внедрять более эффективные методы контроля. Несмотря на высокую надежность изоляторов, суровые эксплуатационные условия требуют применения современных методик проверки оборудования. Один из таких методов – ультразвуковая диагностика, позволяющая обнаруживать трещины и другие дефекты в фарфоровых изоляторах и покрышках. Также используются тепловизионный контроль, акустический и виброакустический методы диагностики, метод фуксиновой пробы и т.д. Однако их применение по отдельности не решает задачу моментального выявления дефектов изоляции, следовательно, нужно разработать комплексный метод исследования, который позволит на ранней стадии увидеть опасные дефекты в изоляции оборудования и собственно изоляторов с целью обеспечения надежной работы электроустановок.

Ключевые слова

диагностика, фарфоровые изоляторы, фарфоровые покрышки, электроэнергетика, методы диагностирования

Для цитирования

Бардушко А.Ю. Комплексная методика диагностирования фарфоровых покрышек электрооборудования и опорно-стержневых изоляторов / А.Ю. Бардушко, М.И. Крапивин, Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2(86). С. 10–23. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).10-23.

Информация о статье

поступила в редакцию: 05.03.2025 г.; поступила после рецензирования: 18.03.2025 г.; принята к публикации: 20.03.2025 г.

Comprehensive diagnostic technique for porcelain covers of electrical equipment and support-rod insulators

A.Yu. Bardushko, M.I. Krapivin, E.Yu. Puzina✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉lena-rus05@mail.ru

Abstract

Maintaining a reliable condition of porcelain insulation is a key factor in ensuring the smooth operation of electrical installations. Insufficient funding in the last 10–15 years has led to an increase in the number of equipment failures in power supply systems. Aging and wear of porcelain insulators without timely diagnostics and maintenance can lead to serious accidents. Traditional control methods, such as visual inspection and insulation resistance measurement, do not always reveal hidden defects, especially under energized operating conditions. In this regard, non-destructive diagnostic methods that allow assessing the condition of insulators without dismantling them become relevant. The condition of the insulation directly depends on its service life and the quality of the diagnostics performed. Therefore, it is necessary to implement more effective methods for monitoring the condition of the insulation. Despite the high reliability of the insulators, severe operating conditions require the use of modern equipment testing methods. One of such methods is ultrasonic diagnostics, which allows detecting cracks and other defects in porcelain insulators and covers. Diagnostic methods such as thermal imaging control, acoustic method, vibro-acoustic, fuchsin test method and others are also used. However, the use of these methods separately does not allow to detect all types of insulation defects at once. Therefore, it is necessary to develop a comprehensive diagnostic method that will allow to detect dangerous defects in the insulation of equipment and the insulators themselves at an early stage, which is necessary to ensure reliable operation of electrical installations.

Keywords

diagnostics, porcelain insulators, porcelain covers, electric power industry, diagnostic methods

For citation

Bardushko A.Yu., Krapivin M.I., Puzina E.Yu. Kompleksnaya metodika diagnostirovaniya farforovykh pokryshek elektrooborudovaniya i oporno-sterzhnevyykh izolyatorov [Comprehensive diagnostic technique for porcelain covers of electrical equipment and support-rod insulators]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. Vol. 86. No. 2. Pp. 10–23. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).10-23.

Article Info

Received: March 5, 2025; Revised: March 18, 2025; Accepted: March 20, 2025.

Введение

В настоящее время для контроля состояния фарфоровых покрышек высоковольтного оборудования и опорно-стержневых изоляторов в условиях эксплуатации используется множество различных методов, существенно отличающихся как по методологическому подходу, так и по техническому исполнению. Своевременная диагностика играет важную роль, так как, например, выход из строя покрышек может привести к серьезным последствиям из-за высокой стоимости и критической значимости поврежденного оборудования. В частности, на железнодорожном транспорте это способно нарушить нормальный режим работы системы тягового электроснабжения и снизить ее пропускную способность [1–6].

Традиционные методы контроля состояния изоляции, такие как визуальный осмотр, не всегда позволяют выявить скрытые дефекты, особенно в условиях эксплуатации под напряжением. В этой связи актуальными становятся неразрушающие методы диагностики, позволяющие оценивать состояние изоляторов без их вывода из эксплуатации. Например, виброакустический метод, применяемый под рабочим напряжением, позволяет обнаруживать трещины и другие дефекты в теле фарфора и местах крепления изоляторов [7–9].

Исследования авторов показали [9–11], что акустико-эмиссионный контроль зарекомендовал себя как эффективный способ выявления дефектов в опорно-стержневых изоляторах. Этот метод основан на регистрации акустических сигналов, возникающих при развитии трещин и других повреждений в материале изолятора. Его применение позволяет своевременно обнаруживать потенциально

опасные дефекты и предотвращать аварийные ситуации.

Важно отметить, что разрушение фарфоровых изоляторов может происходить не только из-за электрических, но и механических воздействий. Лабораторные исследования показывают, что механические повреждения, такие как удары или вибрации, могут приводить к трещинам и последующему выходу из строя изоляторов [10–14].

Таким образом, применяемые методы диагностики изоляции позволяют выявить отдельные виды дефектов фарфоровых покрышек и изоляторов.

Целью данной работы является разработка комплексной методики диагностики фарфоровой изоляции для своевременного обнаружения всех возможных видов дефектов и предотвращения отказов оборудования с фарфоровыми покрышками и опорно-стержневых изоляторов.

Постановка задачи исследования

Перед началом разработки основных положений комплексной методики диагностики изоляции необходимо провести анализ отказов оборудования с фарфоровыми покрышками и опорно-стержневых изоляторов за последние годы для того, чтобы выявить наиболее часто встречающиеся виды дефектов, определиться с причинами их возникновения.

Авторами данной работы собрана статистика по отказам оборудования с фарфоровыми покрышками и опорно-стержневых изоляторов, используемых на одной из российских железных дорог, за период с 1996 г. по 2024 г. (табл. 1). Для наибольшей наглядности представим данные по отказам в виде диаграммы Парето (рис. 1).

Таблица 1. Отказы различных видов фарфоровой изоляции
Table 1. Failures of various types of porcelain insulation

Год Year	Наименование распределительного устройства, кВ Name of distribution device, kV	Виды отказов оборудования и изоляторов Types of equipment and insulator failures
1996	27,5	Разрушение нижнего изолятора выключателя ВВФ-27,5 Destruction of the lower insulator of the VVF-27,5 switch
1998	35	Взрыв ввода МВ-35 Explosion of the MV-35 bushing
2005	220	Пробой изоляции ввода ВМТ-220 кВ Breakdown of the insulation of the VMT-220 kV bushing
	110	Повреждение фарфоровой крышки ВМТ-110 Damage to the porcelain cover of the VMT-110
	27,5	Полное разрушение ТФЗМ-35А Complete destruction of the TFZM-35A
2006	27,5	Повреждение ввода выключателя ВВУ-27,5 Damage to the bushing of the VVU-27.5 switch
2007	10	Повреждение ввода ВМ-10 Т-1 фазы «А» Damage to the VM-10 T-1 bushing of phase «A»
	27,5	Излом опорного изолятора ШР 1 с.ш. фазы «С» Fracture of the support insulator of the ShR 1 s.sh. phase «C»
	110	Повреждение ввода 110 кВ В-110 Т-4. Damage to the 110 kV input V-110 T-4
	10	Перекрытие проходного изолятора ИП-10 ввода ВМ-10 Т-1 фазы «А» Flashover of the IP-10 feedthrough insulator of the VM-10 T-1 input of phase «A»
	27,5	Излом нижнего изолятора РНДЗ-27,5 Fracture of the lower insulator RNDZ-27,5
	110	Повреждение ввода 110 кВ выключателя В-110 Т-4 Damage to the 110 kV input V-110 T-4
	27,5	Излом нижнего изолятора РНДЗ-27,5 Fracture of the lower insulator RNDZ-27,5
	27,5	Излом опорного изолятора ШР 1 с.ш. фазы «С» Fracture of the support insulator SR 1 N.I. phase «C»
2008	110	Повреждение колонки изолятора РС-110. Damage to the column of the insulator RS-110
2009	27,5	Повреждение МВ фидера № 1 Damage to the MV feeder No 1
2010	27,5	Круговая трещина фарфоровой крышки ВМУЭ-27,5 Circular crack of the porcelain cover VMUE-27,5
2011	35	Повреждение ТН ЗНОМ-35-54 Damage to the VT ZNOM-35-54
	220	Разрушение верхней рубашки высоковольтного ввода СВ-220 фазы «С» в ст. 1 с.ш. Destruction of the upper jacket of the high-voltage bushing SV-220 phase «C» in st. 1 N.I.
	220	Разрушение верхней рубашки ввода СВ-220 фазы «С» Destruction of the upper jacket of the SV-220 phase «C» bushing
2012	110	Разрушение вводов фазы «С» МКП-110 Destruction of the phase «C» bushings MKP-110
2014	27,5	Круговая трещина фарфоровой крышки ВБН-27,5 Circular crack of the porcelain cover VBN-27,5
	110	Отключение МВ-110 кВ вследствие разрушения ввода Disconnection of MV-110 kV due to bushing destruction
	110	Излом изолятора типа ИОС-400

		Fracture of the IOS-400 type insulator
2015	27,5	Разгерметизация камеры и разрушение фарфора ВВУ-27,5 Depressurization of the chamber and destruction of the porcelain VVU-27,5
	27,5	Повреждение фарфоровой изоляции ТТ 27,5 кВ Damage to the porcelain insulation of the 27,5 kV CT
	27,5	Излом колонки изолятора ШР-2ФКС Fracture of the column of the ShR-2FKS insulator
	110	Излом оголовника фазы «А» в сторону ВЛ Fracture of the phase «A» head towards the overhead line
2016	27,5	Повреждение высоковольтного ввода выключателя ВБЭТ-27,5 Damage to the high-voltage bushing of the VBET-27.5 circuit breaker
	27,5	Разрушение фарфоровой изоляции ОПН-27,5-2ТН желтой фазы Destruction of the porcelain insulation of the OPN-27,5-2TN yellow phase
	110	Излом колонки разъединителя 110 кВ Fracture of 110 kV disconnector column
	27,5	Излом колонки разъединителя ШР-1-27, повлекшее повреждение ячейки РУ-27,5 Fracture of SR-1-27 disconnector column, resulting in damage to RU-27,5 cell
	110	Лопнула рубашка изоляции полюса ВМТ-110 2Т Insulation jacket of VMT-110 2T pole burst
	220	Разрушение ОПН-220 1Т «С» Destruction of OPN-220 1T «C»
	35	Излом колонки разъединителя 2 РП Fracture of 2 RP disconnector column
2017	27,5	Повреждение выключателя ВКУ-27,5 Damage to VKU-27,5 circuit breaker
	110	Излом колонки изолятора разъединителя ЛР-110 Fracture of LR-110 disconnector insulator column
	110	Излом опорного изолятора ЛР-110 Fracture of LR-110 support insulator
	35	Излом по верхнему фланцу опорного изолятора ИОС-35-500 м/р ШС-4 Fracture along the upper flange of the IOS-35-500 support insulator m/r SHS-4
2018	110	Излом колонки изолятора разъединителя ЛР-110 Fracture of LR-110 disconnector insulator column
	10	Разрушение изолятора средней фазы ТР-10 2Т Destruction of the middle phase insulator TR-10 2T
	35	Разрушение изолятора ФСФ-70 Failure of FSF-70 insulator
2019	10	Разрушение опорного изолятора ввода 10 кВ 2Т Failure of 10 kV input support insulator 2T
	220	Излом верхней колонки изолятора фазы «С» РП-1-220 Fracture of upper column of phase «C» insulator RP-1-220
	220	Повреждение колонки изолятора ШР-1-220 2Т Damage to column of insulator ШР-1-220 2T
2019	10	Разрушение опорного изолятора на вводе 10 кВ 2Т Failure of support insulator at 10 kV input 2T
	10	Перекрытие изоляции В-10 Flashover of insulation V-10
	110	Излом изолятора разъединителя ЛР-110 Fracture of disconnector insulator LR-110
	220	Разрушение фазы «А» ВМТ-220 Failure of phase «A» VMT-220
	35	Перекрытие изоляции ТТ 35 кВ Flashover of 35 kV TT insulation
	110	ТФЗМБ-110 300/5 TFZMB-110 300/5
	110	ТФЗМБ-110 300/5

2020	10	Повреждение верхнего опорного изолятора РС-11 Damage to upper support insulator RS-11
	110	Трещина в нижней рубашке фазы С ВМТ-110 Crack in lower jacket of phase C VMT-110
	27,5	Разрушение изоляции ТН-35 Insulation failure TN-35
	110	Повреждение высоковольтного ввода выключателя МКП-110 Damage to high-voltage input of circuit breaker МКП-110
2021	110	Излом изолятора ШР-110 Insulator failure ShR-110
	110	Повреждение высоковольтного ввода МКП-110 Damage to high-voltage input МКП-110
	110	Разрушение несущей части изолятора ОД-110 2Т Destruction of supporting part of insulator OD-110 2T
	2×27,5	Излом изолятора разъединителя ЛР ФТС-3 Insulator failure of disconnector LR FTS-3
	10	Повреждение проходного изолятора в ячейке В-10 Damage to bushing insulator in cell В-10
2022	110	Излом опорного изолятора типа ОНС-110/600 на разъединителе РП-1-220 фазы «А» Fracture of support insulator type ONS-110/600 on disconnector RP-1-220 phase «A»
	35	Повреждение ВБПС-35 по причине перекрытия полюса Damage to VBPS-35 due to pole overlap
2023	35	Излом у нижнего фланца изолятора ОНС-35/500 Fracture at lower flange of insulator ONS-35/500
2024	110	Повреждение опорного изолятора ОНС-110/600 Damage to the support insulator ONS-110/600
	220	Разрушение высоковольтного ввода фазы «А» В-220 Destruction of the high-voltage input of phase «A» В-220
	10	Излом колонки изолятора РС-11 фазы «А» Fracture of the column of the insulator RS-11 of phase «A»
	27,5	Скол оголовника изолятора обходного разъединителя ОР-40 Chipping of the head of the insulator of the bypass disconnector OR-40
	27,5	Скол оголовника изолятора обходного разъединителя ОР-39 Chipping of the head of the insulator of the bypass disconnector OR-39
	110	Трещина у основания опорного изолятора фазы «В» ЛР-110 Crack at the base of the support insulator of phase «B» LR-110
	110	Излом опорно-стержневого изолятора ИОС-110-400 Fracture of the support-rod insulator IOS-110-400
	110	Течь масла по нижнему фланцу изолятора полюса фазы «А» СВ-110 Oil leak along the lower flange of the pole insulator of phase «A» SV-110

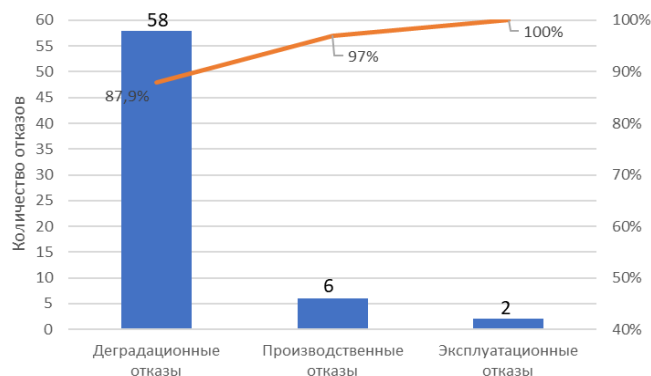


Рис. 1. Анализ отказов фарфоровой изоляции

Fig. 1. Analyses of porcelain insulation failures

Диаграмма (см. рис. 1) явным образом доказывает, что основной причиной отказов оборудования с фарфоровыми покрышками и опорно-стержневых изоляторов является старение изоляции, так как на деградационные отказы приходится 87,9 % отказов от их общего числа. Следовательно, необходимо для предотвращения серьезных последствий таких отказов осуществлять своевременную качественную диагностику фарфоровой изоляции. При этом с

целью обнаружения всех возможных видов дефектов нужно разработать комплексную методику диагностики на базе наиболее эффективных ее методов.

Сравнительный анализ методов диагностики

Для выявления наиболее эффективных методов диагностики выполнено их сравнение по ряду критериев (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение методов диагностики

Table 2. Comparison of diagnostic methods

Наименование метода Name of the method	Суть метода (кратко) The essence of the method (briefly)	Вид выявляемого дефекта Type of defect detected	Достоинства Advantages	Недостатки Disadvantages
Визуальный контроль Visual inspection	Визуальный осмотр покрышек (изоляторов) на наличие видимых повреждений Visual inspection of tires (insulators) for visible damage	Наружные трещины External cracks	Метод наименее затратный, более легкий в усвоении и применении The method is the least expensive, easier to learn and apply	Большое влияние человеческого фактора, невозможность выявления внутренних дефектов Large influence of the human factor, the inability to detect internal defects
Ультразвуковой неразрушающий контроль (прибор УДС2ВФ-ЦИВОМ-ЭП) Ultrasonic non-destructive testing (device UDS2VF-TSIVOM-EP)	Выявление сколов и трещин в полости изолятора с помощью ультразвуковых волн, направленных через материал, регистрируемых и анализируемых для выявления дефектов Detection of chips and cracks in the insulator cavity using ultrasonic waves directed through the material, recorded and analyzed to detect defects	Выявление как микроскопической пористости фарфора, так и макроскопических дефектов «опасных» сечений Detection of both microscopic porosity of porcelain and macroscopic defects of «dangerous» cross-sections	Метод эффективен, позволяет на начальном этапе выявить скрытые дефекты, что может предотвратить серьезные аварии на энергообъекте The method is effective, it allows you to identify hidden defects at the initial stage, which can prevent serious accidents at the power facility	Не рассчитан на выявление околоповерхностных макроскопических дефектов и усталостных дефектов Is not designed to detect about-surface macroscopic defects and fatigue defects
Акустическая эмиссия (прибор ПАК-3М) Acoustic emission (PAK-3M device)	Основан на регистрации нарушения так называемого «эффекта Кайзера» при повторном нагружении дефектного изолятора [7]	Усталостные повреждения в изоляторах Fatigue damage in insulators	Высокая степень выявления дефектов, возможность определения остаточной несущей способности High degree of detection of defects, the	Требуется времени и трудоемко, возможно ухудшение характеристик Requires time and labor, and the characteristics may deteriorate

	It is based on recording violations of the so-called «Kaiser effect» during repeated loading of a defective insulator [7]		ability to determine the residual load-bearing capacity	
Метод фуксиновой пробы (прибор ЦВД-250-3) Fuchsin test method (CVD-250-3 device)	Метод фуксиновой пробы под давлением (ФПД) используется на образцах, отобранных из разрушенных изоляторов The fuchsin pressure test method is used on samples taken from destroyed insulators	Внутренние повреждения полости покрышек и изоляторов Internal damage to the cavity of tires and insulators	Возможность выявления причины разрушения изолятора The ability to identify the cause of insulator failure	Полный разбор оборудования, требует времени, невозможность проверки покрышек и изоляторов, находящихся в работе Complete analysis of equipment, requires time, the inability to check tires and insulators that are in operation
Виброакустический метод (метод вынужденных колебаний) (прибор МИК-1) Vibroacoustic method (forced vibration method) (MIK-1 device)	Определяется по оценке спектральной плотности мощности (СПМ) реакции изолятора на воздействие случайной вибрации с плоским спектром It is determined by evaluating the power spectral density of the insulator response to random vibration with a flat spectrum	Остаточная несущая способность Residual load-bearing capacity	Не требует много времени, возможность диагностирования под напряжением Does not require much time, the ability to diagnose under voltage	Необходимо обучение персонала для корректной интерпретации результатов исследования Personnel training is required for correct interpretation of the study results
Тепловизионный метод (прибор Prism DS) Thermal imaging method (Prism device DS)	Выявление дефектов высоковольтного оборудования, вызывающих изменение температуры дефектных элементов и, как следствие, изменение интенсивности инфракрасного излучения Detection of defects in high-voltage equipment that cause changes in the temperature of defective elements and, as a result, changes in the intensity of infrared radiation	Коронарные разряды, пробой внутренней полости покрышки Coronary discharges, breakdown of the inner cavity of the tire	Оборудование не нужно выводить в ремонт и обесточивать. Выявляет как наружные, так и внутренние дефекты Equipment does not need to be taken out for repair and deenergized. It detects both external and internal defects	Использовать можно только в вечернее и ночное время. Информацию об остаточной несущей способности изолятора не дает Can only be used in the evening and at night. Information about the residual load-bearing capacity of the insulator is not provided

Визуально-акустический метод (визуально-акустический дефектоскоп NL-камера) Visual-acoustic method (visual-acoustic flaw detector NL-camera)	Выявление наружных и внутренних коронарных разрядов за счет направленных ультразвуковых микрофонов [8] Detection of external and internal coronary discharges using directional ultrasound microphones [8]	Наружные и внутренние коронарные разряды External and internal coronary discharges	Оборудование не нужно выводить в ремонт и обесточивать. Выявляет как наружные, так и внутренние дефекты Do not need to be repaired or de-energized. Detects both external and internal defects	Не дает информацию о механических повреждениях изолятора и его остаточной несущей способности Does not provide information about mechanical damage to the insulator and its residual load-bearing capacity
---	---	---	---	---

Анализ данных (см. табл. 2) свидетельствует о том, что ни один из существующих методов диагностики изоляции не позволяет получить полную информацию обо всех возможных дефектах одновременно. В связи с этим наиболее эффективным решением является применение комплексного подхода, включающего несколько методов контроля.

Визуальный осмотр помогает обнаружить до 40 % внешних трещин, ультразвуковая неразрушающая диагностика позволяет выявить скрытые дефекты, а тепловизионный или визуально-акустический метод обеспечивают обнаружение как внешних, так и внутренних повреждений, причем без необходимости отключения оборудования [15–18].

При этом использование тепловизионного метода отличается следующим:

- обеспечивается существенная достоверность результатов за счет минимальной погрешности применяемых диагностических приборов;
- не оказывается влияние на состояние объекта обследования, т.е. является одним из методов неразрушающего контроля;
- не требуется предварительная подготовка обследуемого оборудования.

В случае применения метода ультразвукового неразрушающего контроля (УЗНК) обеспечивается:

- меньшие финансовые затраты ввиду более низкой стоимости реализации данного метода;
- отсутствие опасного влияния на специалиста, выполняющего обследование объекта;
- удобство применения приборов в связи с их небольшими габаритами;
- отсутствие значительной погрешности результатов;
- не приводит к разрушению объекта исследования [19, 20].

Комплексная методика диагностики

Разработка предложений авторами по комплексному методу осуществлялась поэтапно. При оценочном исследовании имеющихся методов диагностики проведен ряд экспериментов, в ходе которых использовались различные приборы, необходимые для осуществления отдельных методов диагностики. Итоги диагностики с применением ультрафиолетового дефектоскопа показаны на рис. 2. При использовании такого метода высока вероятность фиксации камерой прибора разрядов, находящихся на достаточно большом расстоянии от изолятора, что говорит о невысокой точности данного метода.

При проведении эксперимента тепловизионной камерой (рис. 3) зафиксировать пробой по поверхности изолятора существенно сложнее, однако появляется возможность выявить внутренние дефекты: при длительном протекании тока по внутренней поверхности изолятора происходит его нагрев, который можно зафиксировать при применении данного метода.

Прибором для ультразвукового неразрушающего контроля УДС2ВФ-ЦИВОМ-ЭП (рис. 4) продиагностирован ряд фарфоровых крышек и опорно-стержневых изоляторов. Большое количество насадок для прибора и обширный диапазон частот ультразвуковых волн позволяют максимально точно локализовать повреждение, выявить малейшие сколы и микротрещины внутри изолятора.

Прибор для акустической диагностики МЕТАКОН-ЭКСПРЕСС (рис. 5) позволяет достаточно быстро проверить состояние изолятора, однако его низкая универсальность (можно диагностировать только опорно-стержневые изоляторы на 220 кВ определенных марок), а также невысокая достоверность результатов диагностирования (при проведении экспериментов прибор неоднократно на одном и том

же образце выдавал различную оценку его состояния) показали, что он неэффективен при проверке изоляторов различных видов.

Недостатки ультрафиолетового метода устраняются в NL-камере, приборе для визуально-акустического контроля (рис. 6). За счет наличия 144 направленных микрофонов данным прибором можно максимально точно установить место возникновения разрядов, а программное обеспечение дает возможность

быстро определить тип разрядов и построить частотную характеристику.

На основании информации, полученной при анализе методов и проведении ряда экспериментов, авторами данного исследования разработана комплексная методика диагностики, которая включает в себя применение визуального, тепловизионного, визуально-акустического методов и ультразвукового неразрушающего контроля. Общая структура методики показана на рис. 7.

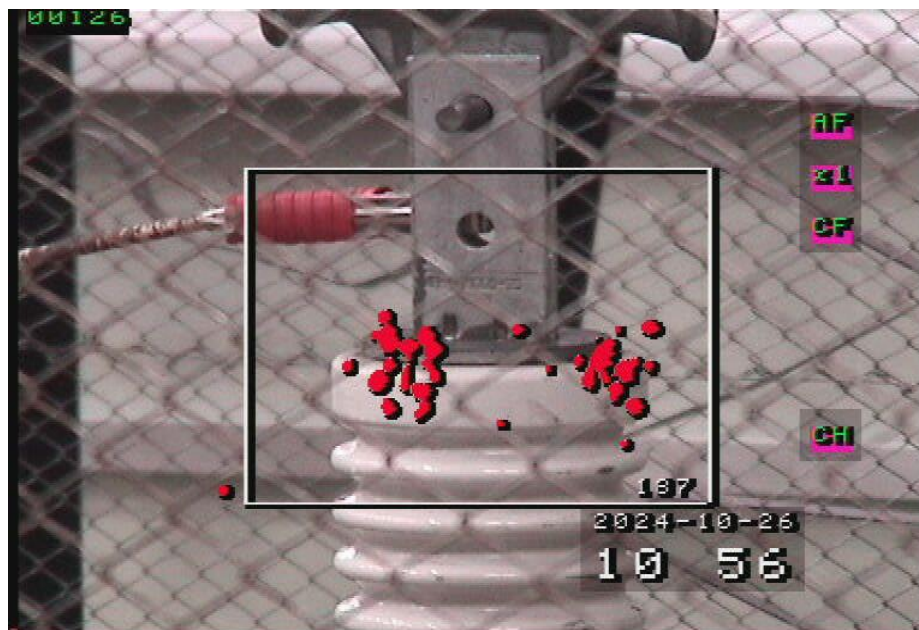


Рис. 2. Ультрафиолетовая камера

Fig. 2. Ultraviolet chamber

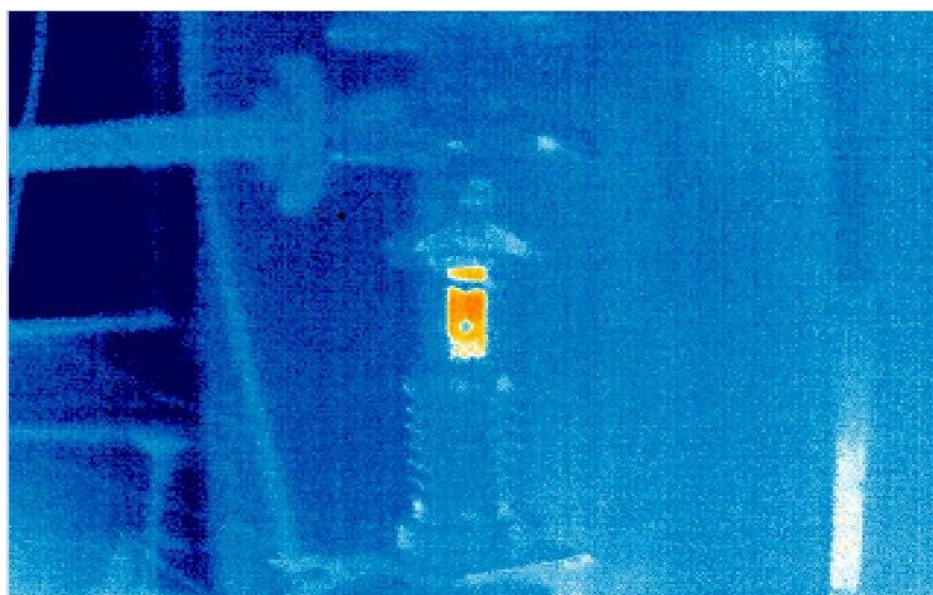


Рис. 3. Применение тепловизионного метода

Fig. 3. Application of the thermal imaging method

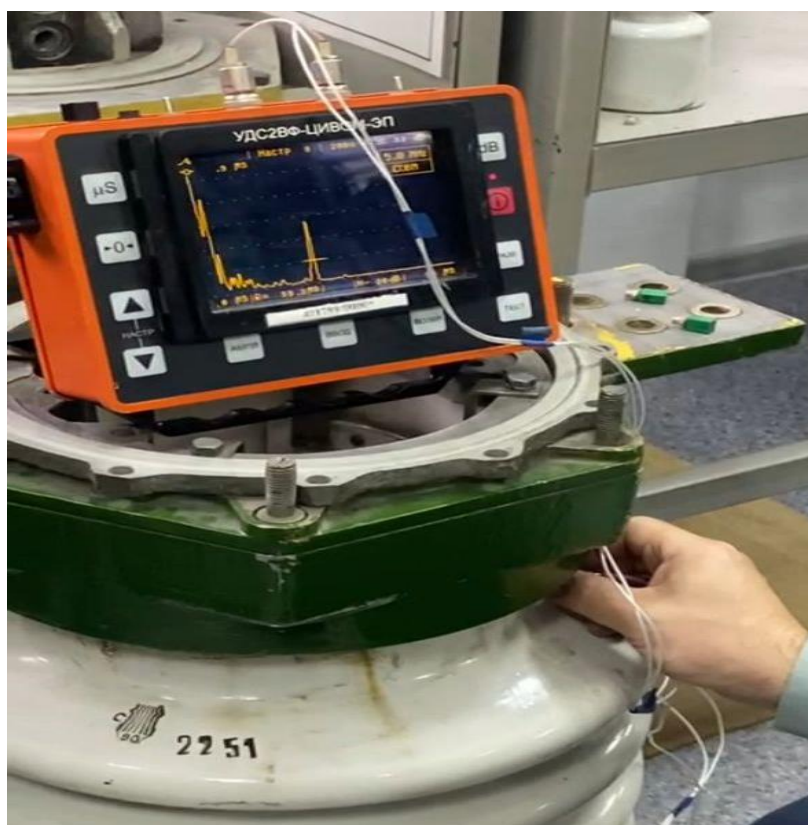


Рис. 4. Ультразвуковой неразрушающий контроль
Fig. 4. Ultrasonic non-destructive testing



Рис. 5. Акустический контроль
Fig. 5. Acoustic control



Рис. 6. Визуально-акустический контроль

Fig. 6. Visual and acoustic control

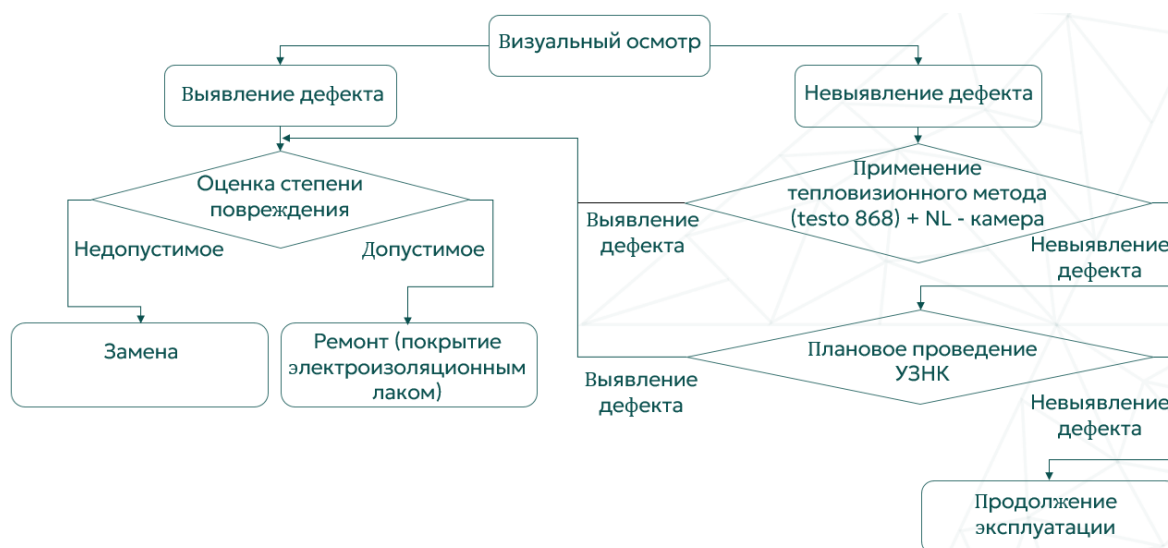


Рис. 7. Структурная схема комплексной диагностики

Fig. 7. Structural diagram of complex diagnostics

Согласно этой методике (см. рис. 7) процесс диагностики будет проходить поэтапно. Первый этап заключается в визуальном осмотре. По его результатам будет принято решение либо об отсутствии необходимости дальнейшего диагностирования в случае выявления явных видимых поверхностных дефектов изоляции и вынесено заключение по замене покрывки или изолятора, либо, при наличии допустимых по-

верхностных дефектов, будут рекомендованы частичный ремонт или использование более глубокого метода диагностирования.

В последнем случае на втором этапе, согласно разработанной методике, должно быть выполнено тепловизионное обследование. Его результаты при выявлении дефекта выводят на тот же путь, что соответствует первому этапу с учетом оценки степени повреждения. В случае

же невыявления дефекта нужно в плановом порядке через определенный период времени применить такой метод диагностики, как УЗНК. При выявлении дефекта вновь уходим по пути первого этапа, при невыявлении приходим к заключению об отсутствии дефектов в изоляции и возможности продолжения эксплуатации оборудования с фарфоровыми крышками или опорно-стержневыми изоляторами.

Считаем, что существенным достоинством данной методики будет рост количества выявляемых дефектов при незначительном увеличении времени диагностики. Внедрение разработанной методики приведет к сокращению числа отказов оборудования и изоляторов, предотвратит ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям, повысит надежность работы электроустановок.

Заключение

Для повышения надежности работы систем электроснабжения, в том числе и на элек-

трифицированных железных дорогах, необходимо внедрять современные методы неразрушающего контроля фарфоровых изоляторов и крышек оборудования, проводить регулярные диагностические мероприятия и учитывать влияние как электрических, так и механических факторов на состояние изоляции. С целью реализации поставленных задач предлагается использовать на практике разработанную комплексную методику диагностирования изоляции. Это позволит своевременно выявлять и устранять дефекты, предотвращая аварийные ситуации и обеспечивая стабильную работу энергетических систем [18–20].

Для электрифицированных железных дорог основным результатом использования предложенной методики будет повышение уровня безопасности перевозочного процесса, сокращение расходов на замену поврежденного оборудования, стабильность обеспечения электроэнергией потребителей.

Список литературы

1. Хамматуллин Д.К. Методы контроля фарфоровых изоляторов высоковольтных разъединителей // *Мировая наука*. 2022. № 2 (59). С. 106–108.
2. Методы диагностирования электрооборудования / А.А. Манаенков, Д.В. Гурьянов, А.В. Чувилкин и др. // *Наука и образование*. 2021. Т. 4. № 2. URL : https://elibrary.ru/download/elibrary_47110489_38929421.pdf (Дата обращения 28.02.2025).
3. Черепанов А.В., Бардушко А.Ю. Анализ режимов системы тягового электроснабжения на участке Зима – Гончарово при внедрении систем АБТЦ-МШ и «виртуальная сцепка» // *Молодая наука Сибири*. 2023. № 1 (19). С. 100–108. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/1073> (Дата обращения 18.03.2025)
4. Крапивин М.И., Пузина Е.Ю. Разработка предложений по устранению лимитирующих межподстанционных зон при развитии Восточного полигона // *Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2024*. С. 61–65.
5. Крапивин М.И., Куцый А.П., Пузина Е.Ю. Разработка технических решений по увеличению пропускной способности системы тягового электроснабжения участка Восточного полигона // *Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России : сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. Сургут, 2024*. С. 180–186.
6. Бардушко А.Ю., Куцый А.П. Повышение пропускной способности электрифицированного участка железной дороги Якурим – Киренга на перспективу // *Молодая наука Сибири*. 2023. № 4 (22). С. 182–193.
7. Вибрационный контроль механического состояния опорно-стержневых фарфоровых изоляторов звуковым и низкочастотным ультразвуковым методами / А.М. Гатауллин, А.А. Наумов, Д.Ф. Губаев и др. // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2008. № 1-2. С. 112–118.
8. Колмаков В.О., Калошина В.Г., Курчевский М.С. Система диагностики изоляции контактной сети по ультрафиолетовому излучению // *Аллея науки*. 2020. Т. 1. № 10 (49). С. 202–205.
9. Тепловизионный контроль изоляторов распределительных устройств и воздушных линий электропередач напряжением 0,4–220 кВ / А.Н. Шпиганович, А.Н. Мамонтов, К.А. Пушница и др. // *Вести высших учебных заведений Черного моря*. 2020. № 2 (60). С. 18–27.
10. Диагностика фарфоровых изоляторов по характеристикам частичных разрядов / А.М. Гатауллин, А.Н. Гавриленко, Ю.В. Писковацкий и др. // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2024. Т. 26. № 5. С. 19–30.
11. Галаган Р.М., Еременко В.С. Ультразвуковая система диагностики технического состояния фарфоровых изоляторов // *Вестн. Национал. техн. ун-та Украины «Киевский политехнический институт»*. Сер.: Приборостроение. 2011. № 42. С. 62–70.
12. Диагностика механического состояния опорно-стержневой фарфоровой изоляции высоковольтных разъединителей в условиях эксплуатации / В.Э. Воротницкий, И.Н. Дмитриев, А.В. Млотов и др. // *Энергия единой сети*. 2014. № 2 (13). С. 2–14.
13. Смирнов В.В., Скидан А.А., Кавун А.И. Анализ диагностики механического состояния опорно-стержневых изоляторов методом акустической эмиссии // *Энергетические установки и технологии*. 2019. Т. 5. № 1. С. 116–119.
14. Зарипов Д.К. Методы дистанционного контроля состояния многоэлементных изолирующих конструкций электрифицированных железных дорог : автореф. дис. . канд. техн. наук. Казань, 2006. 16 с.

15. Луковенко А.С. Система диагностики опорно-стержневой фарфоровой изоляции на цифровых подстанциях // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 6 (57). С. 106–111.
16. Дуля А.А. Технические средства и технология диагностирования подвесных фарфоровых тарельчатых изоляторов // Теория и практика современной науки. 2017. № 6 (24). С. 271–274.
17. Завидей В.И. Дистанционные методы и системы дефектоскопии высоковольтной изоляции электрооборудования по оптическому излучению // Новое в российской электроэнергетике. 2010. № 9. С. 5–12.
18. Кузнецов А.А., Кузьменко А.Ю. Методика дистанционного диагностирования подвесных фарфоровых изоляторов контактной сети постоянного тока // Известия Транссиба. 2019. № 1 (37). С. 64–72.
19. Рейх Е.Н., Сыченко В.Г., Ким Е.Д. Анализ методов и средств диагностирования для оценки состояния изоляторов контактной сети // Электрификация транспорта. 2012. № 4. С. 54–62.
20. Куценко С.М. Разработка дистанционной диагностики линейной изоляции контактной сети железнодорожного транспорта : дис. . канд. техн. наук. Иркутск, 2006. 143 с.

References

1. Khammatulin D.K. Metody kontrolya farforovykh izolyatorov vysokovol'tnykh raz''edinitelei [Methods of control of porcelain insulators of high-voltage disconnectors]. *Mirovaya nauka* [World science], 2022, no 2 (59), pp. 106–108.
2. Manaenkov A.A., Gur'yanov D.V., Chuvilkin A.V., Naidenov A.A. Metody diagnostirovaniya elektrooborudovaniya [Methods for diagnosing electrical equipment]. *Nauka i obrazovanie* [Science and education], 2021, Vol. 4, no 2. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_47110489_38929421.pdf (Accessed February 28, 2025).
3. Cherepanov A.V., Bardushko A.Yu. Analiz rezhimov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na uchastke Zima – Goncharovo pri vnedrenii sistem ABTTs-MSH i «virtual'naya stepka» [Analysis of traction power supply system modes in the Zima – Goncharovo section during the implementation of the ABTC-MSH and virtual coupling systems]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 1 (19), pp. 100–108.
4. Krapivin M.I., Puzina E.Yu. Razrabotka predlozhenii po ustraneniyu limitiruyushchikh mezhpodstantsionnykh zon pri razviti Vostochnogo poligona [Development of proposals for the elimination of limiting substation zones in the development of the Eastern polygon]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Issledovanie i razvitie rel'sovogo i avtomobil'nogo transporta»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Research and development of rail and road transport»]. Ekaterinburg, 2024, pp. 61–65.
5. Krapivin M.I., Kutsyi A.P., Puzina E.Yu. Razrabotka tekhnicheskikh reshenii po uvelicheniyu propusknnoi sposobnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Vostochnogo poligona [Development of technical solutions to increase the capacity of the traction power supply system of the Eastern polygon site]. *Sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy elektroenergetiki i telekommunikatsii Severa Rossii»* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference «Problems of electric power industry and telecommunications of the North of Russia»]. Moscow, 2024, pp. 180–186.
6. Bardushko A.Yu., Kutsyi A.P. Povyshenie propusknnoi sposobnosti elektrifitsirovannogo uchastka zheleznoi dorogi Yakurim – Kirenga na perspektivu [Increasing the capacity of the electrified section of the Yakurim – Kirenga railway for the future]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 4 (22), pp. 182–193.
7. Gataullin A.M., Naumov A.A., Gubaev D.F., Schmidt S.V. Vibratsionnyi kontrol' mekhanicheskogo sostoyaniya oporno-sterzhnevyykh farforovykh izolyatorov zvukovym i nizkochastotnym ul'trazvukovym metodami [Vibration control of the mechanical state of support-rod porcelain insulators by sound and low-frequency ultrasonic methods]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki* [Bulletins of higher educational organizations. Energy problems], 2008, no 1-2, pp. 112–118.
8. Kolmakov V.O., Kaloshina V.G., Kurchevskii M.S. Sistema diagnostiki izolyatsii kontaktnoi seti po ul'traioletovomu izlucheniuyu [A system for diagnosing the insulation of a contact network by ultraviolet radiation]. *Alleya nauki* [Alley of Science], 2020, Vol. 1, no 10 (49), pp. 202–205.
9. Shpiganovich A.N., Mamontov A.N., Pushnitsa K.A., Kustov A.N. Teplovizionnyi kontrol' izolyatorov raspredelitel'nykh ustroystv i vozdukhnykh liniy elektroperedach napryazheniem 0,4-220 kV [Thermal imaging monitoring of switchgear insulators and overhead power lines with a voltage of 0,4-220 kV]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya* [Bulletins of higher educational organizations of the Chernozem region], 2020, no 2 (60), pp. 18–27.
10. Gataullin A.M., Gavrilenko A.N., Piskovatskii Yu.V., Minkin A.S. Diagnostika farforovykh izolyatorov po kharakteristikam chastichnykh razryadov [Diagnostics of porcelain insulators based on partial discharge characteristics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki* [Bulletins of higher educational organizations. Energy problems], 2024, Vol. 26, no 5, pp. 19–30.
11. Galagan R.M., Eremenko V.S. Ul'trazvukovaya sistema diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya farforovykh izolyatorov [Ultrasonic diagnostic system for the technical condition of porcelain insulators]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy «Kievskii politekhnicheskii institut». Seriya: Priborostroenie* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Series: Instrument engineering], 2011, no 42, pp. 62–70.
12. Vorotnitskii V.E., Dmitriev I.N., Mlotok A.V., Demin A.N. Diagnostika mekhanicheskogo sostoyaniya oporno-sterzhnevoi farforovoi izolyatsii vysokovol'tnykh raz''edinitelei v usloviyakh ekspluatatsii [Diagnostics of the mechanical condition of the support-rod porcelain insulation of high-voltage disconnectors under operating conditions]. *Energiya edinoy seti* [United Grid Energy], 2014, no 2 (13), pp. 2–14.
13. Smirnov V.V., Skidan A.A., Kavun A.I. Analiz diagnostiki mekhanicheskogo sostoyaniya oporno-sterzhnevyykh izolyatorov metodom akusticheskoi emissii [Analysis of diagnostics of the mechanical state of support-rod insulators by acoustic emission method]. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii* [Energy installations and technologies], 2019, Vol. 5, no 1, pp. 116–119.

14. Zaripov D.K. Metody distantsionnogo kontrolya sostoyaniya mnogoelementnykh izoliruyushchikh konstruktii elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Methods of remote monitoring of the condition of multi-element insulating structures of electrified railways]. Ph.D.'s theses. Kazan', 2006. 16 p.
15. Lukovenko A.S. Sistema diagnostiki oporno-sterzhnevoi farforovoi izolyatsii na tsifrovyykh podstantsiyakh [Diagnostic system of support-rod porcelain insulation at digital substations]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electric power. Transmission and distribution], 2019, no 6 (57), pp. 106–111.
16. Dulya A.A. Tekhnicheskie sredstva i tekhnologiya diagnostirovaniya podvesnykh farforovykh tarel'chatykh izolyatorov [Technical means and technology of diagnostics of suspended porcelain plate insulators]. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki* [Theory and practice of modern science], 2017, no 6 (24), pp. 271–274.
17. Zavidei V.I. Distantsionnye metody i sistemy defektoskopii vysokovol'noi izolyatsii elektrooborudovaniya po optich-eskomu izlucheniyu [Remote methods and systems of flaw detection of high-voltage insulation of electrical equipment by optical radiation]. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike* [New in the Russian electric power industry], 2010, no 9, pp. 5–12.
18. Kuznetsov A.A., Kuz'menko A.Yu. Metodika distantsionnogo diagnostirovaniya podvesnykh farforovykh izolyatorov kontaktnoi seti postoyannogo toka [Methods of remote diagnosis of suspended porcelain insulators of a direct current contact network]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2019, no 1 (37), pp. 64–72.
19. Reikh E.N., Sychenko V.G., Kim E.D. Analiz metodov i sredstv diagnostirovaniya dlya otsenki sostoyaniya izolyatorov kontaktnoi seti [Analysis of diagnostic methods and tools for assessing the condition of contact network insulators]. *Elektrifikatsiya transportu* [Electrification of transport], 2012, no 4, pp. 54–62.
20. Kutsenko S.M. Razrabotka distantsionnoi diagnostiki lineinoi izolyatsii kontaktnoi seti zheleznodorozhnogo transporta [Development of remote diagnostics of linear isolation of the contact network of railway transport]. Ph.D.'s theses. Irkutsk, 2006. 143 p.

Информация об авторах

Бардушко Александр Юрьевич, кафедра электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: aleksandr.bardushko@yandex.ru.

Крапивин Михаил Иванович, кафедра электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: mihaail.krapivin03@gmail.com.

Пузина Елена Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

Information about the authors

Aleksandr Yu. Bardushko, Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: aleksandr.bardushko@yandex.ru.

Mikhail I. Krapivin, Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: mihaail.krapivin03@gmail.com.

Elena Yu. Puzina, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

Разработка лабораторного стенда для исследования нагруженности буксового узла

И.В. Ковригина¹, Р.С. Большаков²✉

¹Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита, Российская Федерация

²Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉bolshakov_rs@mail.ru

Резюме

В статье представлены результаты исследования изменения температуры буксовых узлов с подшипниками различного типа с учетом колеи железной дороги при движении по заданному участку с помощью разработанного лабораторного стенда. Произведено моделирование скорости движения на предполагаемом участке согласно единой режимной карте в соответствии с расположением прямых, кривых малого радиуса и возвышением наружного рельса. Применение заявленной лабораторной установки будет способствовать повышению достоверности результатов стендовых испытаний и обеспечит более точное воспроизведение эксплуатационных условий работы буксовых узлов колесных пар тележек грузовых вагонов. Используемая установка позволит задавать вертикальную и боковую нагрузки, а также моделировать скорость движения поездов в зависимости от нормативных показателей расположения и радиуса кривых, возвышения наружного рельса и скорости движения. Оценивается возможность анализа работоспособности буксовых узлов с помощью установления критических параметров для роликов и воздействия радиальных и осевых нагрузок. В работе приведены результаты сравнительных испытаний двух комплектов роликовых букс с цилиндрическими роликовыми и коническими подшипниками. Применяемый лабораторный стенд может быть использован при проектировании и модернизации испытательных установок, предназначенных для оценки температуры нагрева подшипников с комбинированным нагружением, а также при тестировании подшипников качения в условиях, максимально приближенных к реальным.

Ключевые слова

испытательная установка, буксовый узел, изменение температуры нагрева, грузовой вагон, роликовые и конические подшипники

Для цитирования

Ковригина И.В. Разработка лабораторного стенда для исследования нагруженности буксового узла / И.В. Ковригина, Р.С. Большаков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 24–34. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).24-34.

Информация о статье

поступила в редакцию: 23.05.2025 г.; поступила после рецензирования: 03.06.2025 г.; принята к публикации: 04.06.2025 г.

Designing of the laboratory stand for the research of axle box loading

I.V. Kovrigina¹, R.S. Bol'shakov²✉

¹Trans-Baikal Institute of Railway Transport – branch of the Irkutsk State Transport University, Chita, the Russian Federation

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉bolshakov_rs@mail.ru

Abstract

The article presents the results of studying the temperature change during the interaction of the axle box unit and bearings of various types, taking into account the track gauge of the railway when moving along a given section using the developed laboratory bench. The objective of the study is to determine the dependence of the heating temperature of the axle box units on the specified vertical and lateral loads. The speed of movement on the studied section was simulated according to a single mode map, taking into account the location of straight lines, small-radius curves and the elevation of the outer rail. The use of the declared laboratory setup will increase the reliability of the bench tests and ensure a more accurate reproduction of the operating conditions of the axle box units of wheelsets of freight car bogies. The used test setup will allow to set vertical and lateral loads, as well as to simulate the speed of trains taking into account the location and radius of curves, the elevation of the outer rail, the established speed of movement in accordance with the current instructions. The possibility of analyzing the operability of the axle box units by setting critical parameters for rollers and the impact of radial and axial loads is assessed. The results of comparative tests of two sets of roller boxes with cylindrical roller and tapered bearings are presented. The laboratory stand used can be utilized in designing and upgrading test instal-

lations intended for evaluating the heating temperature of bearings with combined loading, as well as in testing rolling bearings when simulating conditions close to real ones.

Keywords

test rig, axle box assembly, change in heating temperature, freight wagon, roller and tapered bearings

For citation

Kovrigina I.V., Bol'shakov R.S. Razrabotka laboratornogo stenda dlya issledovaniya nagruzhenosti buksovogo uzla [Designing of the laboratory stand for the research of axle box loading]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 24–34. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).24-34.

Article Info

Received: May 23, 2025; Revised: June 3, 2025; Accepted: June 4, 2025.

Введение

Железнодорожному транспорту в современных условиях требуется сохранить поступательное движение, в том числе с учетом возрастающих нагрузок на инфраструктурные элементы [1–3]. В этой связи необходимо повышенное внимание к существующим техническим объектам, характерным для железнодорожного транспорта.

При проектировании различных конструкций обязательно нужно производить инженерные расчеты [4–8]. Надежность конструкции обеспечивается тем, что она сохраняет прочность, жесткость и устойчивость при гарантированной долговечности. Ее экономичность в значительной мере определяется расходом материала, применением менее дефицитных конструкционных материалов, возможностью изготовления деталей по наиболее прогрессивным технологиям [9–13].

Необходимо учитывать, что эксперименты на реальных технических объектах достаточно затратны, что требует поиска и разработки подходов по проектированию и созданию испытательных установок [14–18].

При проведении испытаний на лабораторном стенде прикладываются как постоянные, так и временные внешние нагрузки (силы). Собственный вес вагона – постоянно действующая нагрузка, продольная нагрузка при прохождении имитируемого объекта в кривых малого радиуса – временная.

По характеру изменения силы во времени различают нагрузки статического и динамического характера. Статические (постоянные) нагрузки изменяют свою величину или точку приложения (направление) с очень небольшой скоростью, так что возникающими при этом ускорениями (силами инерции) можно пренебречь.

Взаимодействие между частями рассматриваемого тела характеризуется внутренними силами, которые возникают в теле под действием внешних нагрузок и определяются силами межмолекулярного воздействия. Эти силы сопротивляются стремлению внешних сил разрушить элемент конструкции, изменить его форму, отделить одну часть от другой. Учет всех факторов, действующих на узлы и агрегаты технических объектов различного назначения, является одним из важнейших направлений исследований в технических науках [17–20].

Цель работы заключается в определении зависимости температуры нагрева буксовых узлов от заданных вертикальных и боковых нагрузок с использованием лабораторного стенда.

Материалы и методы

Стенд для испытания подшипников букс колесных пар состоит из рамы, упорных стоек с упорной плитой, оси с буксами и испытуемыми подшипниками, устройства для статического радиального и осевого нагружений подшипников, двигателя, механизмов передачи и регулирования скорости вращательного j движения оси. Стенд позволит исследовать два типа букс с роликовыми подшипниками – коническими и кассетного типа (рис. 1).

Стенд (см. рис. 1) имеет основание 1, приваренные к нему тумбу электродвигателя 2 и тумбу 3 крепления опорной буксы 4. Места сварных швов на стенде обозначены сочетанием «СШ». Также к основанию приварены четыре фланца с резьбой 5 для крепления четырех упорных стоек 6. Сверху к упорным стойкам 6 прикручена упорная плита 7. Для создания радиальной нагрузки на испытуемую буксу 17 сверху установлен домкрат 16. В спорную буксу вставлена ось 8 для установки испытуемой буксы. На две передние упорные стойки уста-

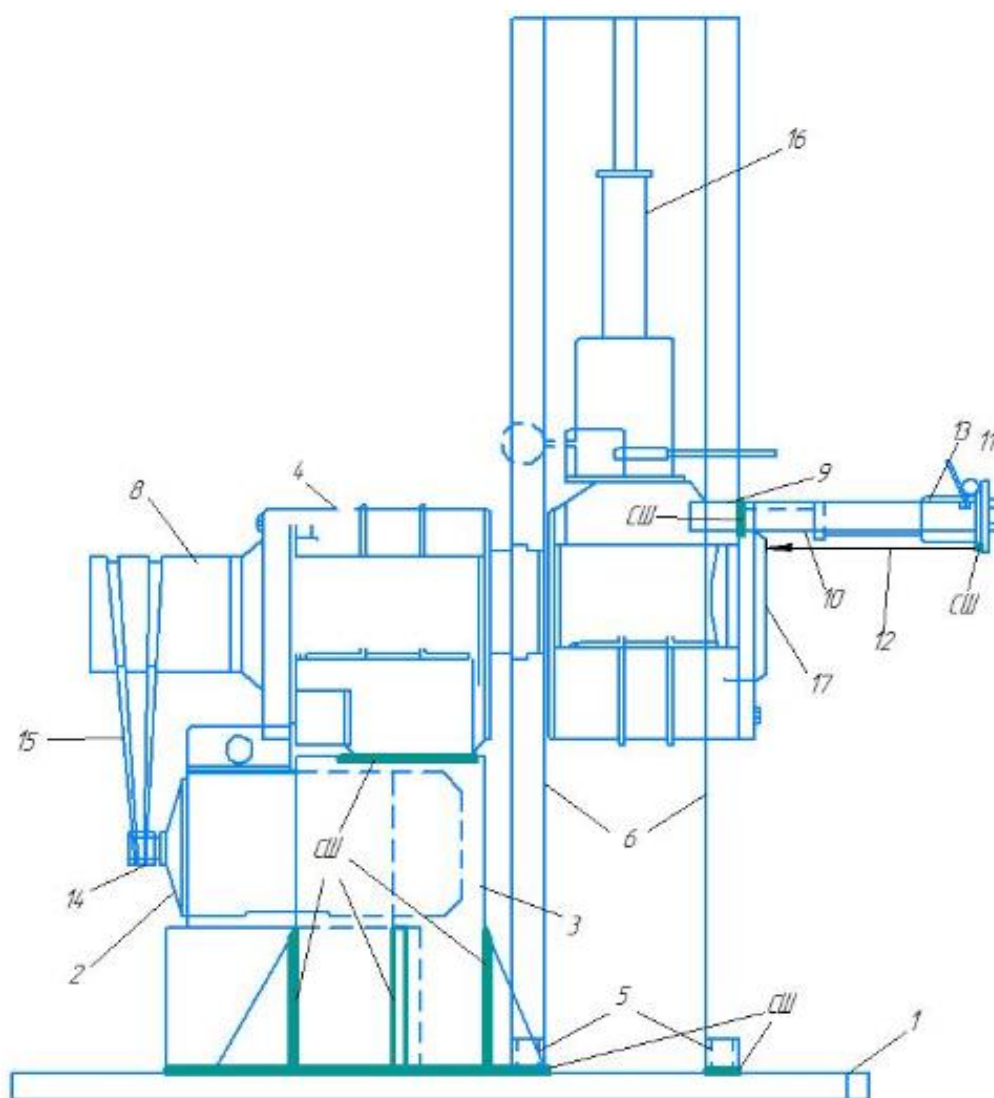


Рис. 1. Детализовка лабораторного стенда
Fig. 1. Detailed view of the laboratory stand

новлены регулируемые по высоте крепления 9. К креплениям приварены стержни 10 с прикрученной упорной плитой 11 и полочкой 12. Для создания осевой нагрузки на испытуемую буксу в горизонтальном положении на полочку устанавливается второй домкрат 13, который упирается одной стороной в упорную плиту, а другой стороной в испытуемую буксу для создания осевой нагрузки. На вал электродвигателя установлен шкив 14 для клиновидного ременного привода 15, который обеспечивает передачу крутящего момента от электродвигателя к оси стенда.

При включении тумблера электропитания напряжение 720 В с частотой 50 Гц через автомат защиты сети (45А) подается на входные

клеммы универсального частотного преобразователя (УЧП). Затем включается сам УЧП. В зависимости от показания заданных параметров на дисплее УЧП переменный трехфазный ток напряжением 380 В с определенной частотой поступает на входные клеммы электродвигателя. Электродвигатель в свою очередь раскручивает ось стенда с заданной скоростью через ременную передачу. Ось, расположенная в опорной буксе, раскручивается до установленной скорости в исследуемой буксе, чем имитирует работу испытуемых подшипников. Домкрат, находящийся опорной частью на исследуемой буксе и своим штоком упирающийся в упорную плиту, имитирует радиальную нагрузку на ось. Второй домкрат, находящийся на полочке

в горизонтальном положении и упирающийся в верхнюю или нижнюю зону передней торцевой части корпуса буксы, имитирует своим давлением прохождение кривых участков пути.

Объектом испытаний является один буксовый узел колесной пары РУ 1-950-Г (черт. 100.10.000-8 СБ) с роликовыми цилиндрическими подшипниками с торцевым креплением гайкой М110 типа ТВУ 130×250, изготовлен-

ные по ТУ ВНИПТ048-1-00 (рис. 2), установленный на ось лабораторного стенда.

Другой буксовый узел колесной пары РУ 1-957-Г (черт. 100.10.900-0 СБ) кассетного типа марки SKF размером 130×250×160 мм, изготовленный по ТУ SKF.СТВУ.001-2010, установлен также на ось лабораторного стенда. Подшипник марки SKF размером 130×250×160 мм устанавливается в серийный корпус буксы грузовых

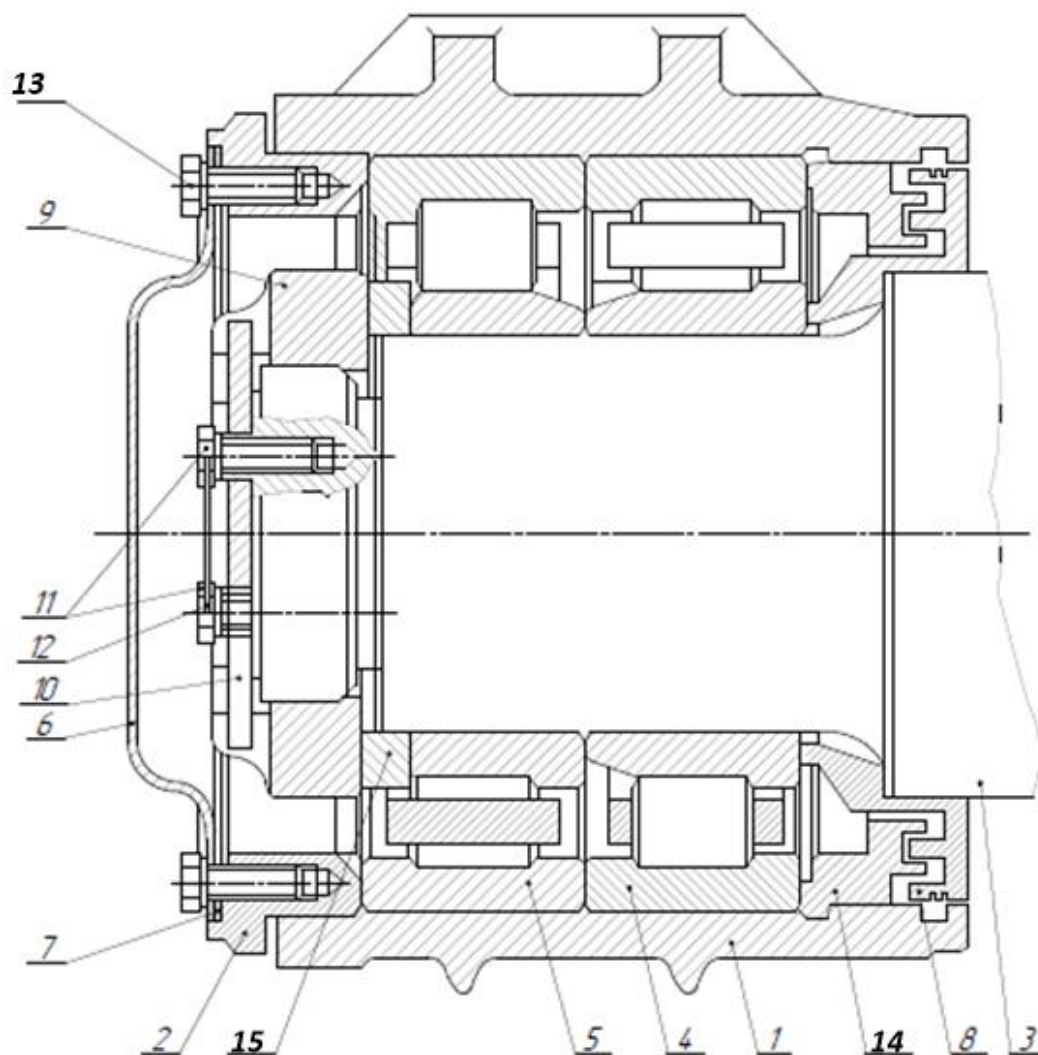


Рис. 2. Буксовый узел с двумя роликовыми цилиндрическими подшипниками с торцевым креплением гайкой М110:

- 1 – корпус буксы; 2 – крепительная крышка отъемного лабиринта корпуса буксы; 3 – колесная пара;
 4 – задний подшипник; 5 – передний подшипник; 6 – смотровая крышка; 7 – резиновое уплотнение; 8 – лабиринтное кольцо; 9 – торцевая гайка; 10 – стопорная планка; 11 – болт М12 стопорной планки; 12 – увязочная проволока; 13 – болт М12 смотровой крышки;
 14 – лабиринтное уплотнение; 15 – упорное кольцо переднего подшипника
- Fig. 2.** Axlebox unit with two cylindrical roller bearings with end screw M110:
 1 – axle box housing; 2 – fastening cover of the detachable labyrinth of the axle box housing; 3 – wheel-set;
 4 – rear bearing; 5 – front bearing; 6 – inspection cover; 7 – rubber seal;
 8 – labyrinth ring; 9 – end screw; 10 – locking strip; 11 – M12 bolt of the locking strip; 12 – tie-down wire;
 13 – M12 bolt of the inspection cover; 14 – labyrinth seal; 15 – thrust ring of the front bearing

вагонов. В соответствии с рис. 2 крепление с торца подшипника осуществляется шайбой и вместе с корпусом буксы и дополнительным лабиринтным кольцом (далее лабиринтом) напрессовывается на шейку и предподступичную часть оси. Корпус буксы закрывается крепительной и смотровой крышками (рис. 3).

Исследование проводилось на одном из маршрутов Забайкальской железной дороги.

Радиальная нагрузка прикладывается в трех точках поочередно (рис. 4) и является постоянной – равной 98 кН.

Осевая нагрузка является временной и в среднем равна 14 кН. В точке *A* осевая нагрузка прикладывается в четном направлении, имитируя осевую нагрузку при движении тележки грузового вагона в правом повороте. В точке *B* осевая нагрузка прикладывается в нечетном

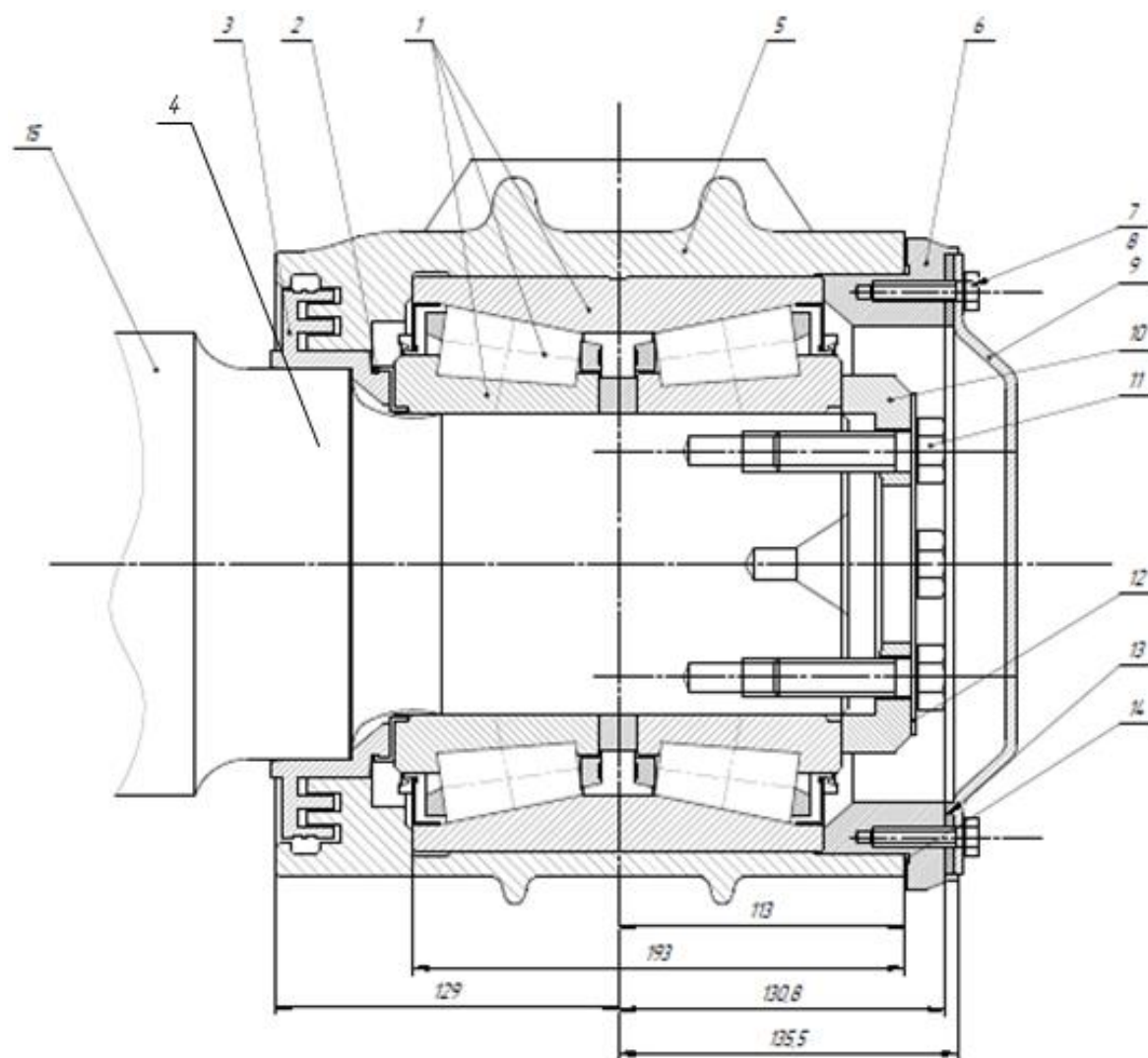


Рис. 3. Буксовый узел грузового вагона с коническими роликовыми подшипниками кассетного типа:

- 1 – подшипник TBU 130×250; 2 – прокладка полимерная; 3 – кольцо лабиринтное; 4 – ось РУ1Ш;
- 5 – корпус буксы; 6 – крепительная крышка; 7 – болт М12 для крепления смотровой крышки;
- 8 – болт М12 стопорной планки с пружинной шайбой (шайба наружная); 9 – крышка смотровая;
- 10 – болт М12 стопорной планки с пружинной шайбой шайба тарельчатая; 11 – болт М20 для крепления торцевой шайбы; 12 – стопорная шайба; 13 – прокладка; 14 – кольцо уплотнительное

Fig. 3. Axlebox unit of a freight car with tapered roller bearings of the cassette type:

- 1 – TBU 130×250 bearing; 2 – polymer gasket; 3 – labyrinth ring; 4 – RU1Sh axle; 5 – axle box housing;
- 6 – mounting cover; 7 – M12 bolt for fastening the inspection cover;
- 8 – M12 bolt of the locking plate with a spring washer (outer washer); 9 – inspection cover;
- 10 – M12 bolt of the locking plate with a spring washer, disc washer; 11 – M20 bolt for fastening the end washer;
- 12 – lock washer; 13 – gasket; 14 – sealing ring

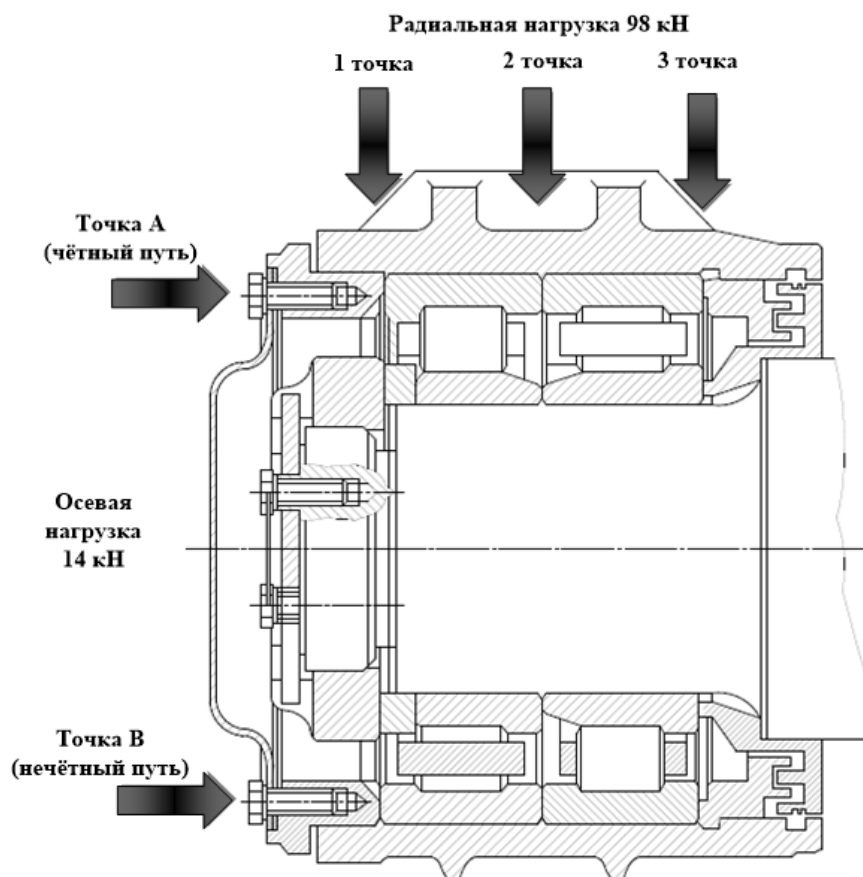


Рис. 4. Точки приложения нагрузки на буксовый узел
Fig. 4. Points of application of load on the axle box assembly

Таблица 1. Порядок нагружения подшипника
Table 1. Bearing loading order

Тип нагрузки Load type	Точки приложения нагрузки при моделировании движения тележки грузового вагона в повороте Load application points when simulating the motion of a freight wagon bogie in a turn					
Радиальная Radial	1		2		3	
Осевая Axial	А	Б	А	Б	А	Б

направлении, имитируя осевую нагрузку при движении тележки рулевого вагона в левом повороте (рис. 4).

Порядок нагружения подшипников осуществляется по данным табл. 1.

Методика проведения исследований основана на использовании возможностей лабораторного стенда. Моделирование применяется в тех случаях, когда проведение реального эксперимента сопряжено с опасностью, высокими экономическими и временными затратами или если он неудобен в масштабе пространства и времени [1].

Принцип, на котором основывалось моделирование, базируется на последовательной обработке процессов, которые в реальном времени происходят параллельно [1]. В связи с этим алгоритмы моделирования имеют свои особенности:

- продвижение системы во времени и отслеживание временной координаты;
- обеспечение синхронной работы объектов, из которых состоит моделируемая система.

В настоящий момент имеются четыре основных принципа: регламентации событий (принцип dt); особых состояний; последова-

тельной проводки заявок; параллельной работы объектов.

Принцип dt состоит в том, что алгоритмом моделирования имитируется движение, т.е. изменение состояния системы в фиксированные моменты времени согласно (1):

$$t, t + dt, t + 2dt. \quad (1)$$

Для измерения температуры применялись два контактных цифровых термометра digital thermo WT-2. Один определял температуру в верхней части корпуса буксового узла в заданных точках (1–3), а другой – температуру окружающей среды. Считывание информации о тепловом мониторинге производилось параллельно в режиме реального времени после прохождения каждого километра. Для измерения времени применялся секундомер с функцией записи общего времени и функцией записи одного отрезка времени поочередно до 100 отрезков.

Результаты исследований

Чтобы вычислить заданную скорость движения поезда на соответствующем участке пути и смоделировать ее на лабораторном стенде, необходимо:

– рассчитать обороты оси стенда в минуту для заданной скорости.

– найти опытным путем соответствующую частоту УЧП для заданных оборотов оси в минуту.

Рассчитаем обороты оси стенда в минуту ω для скоростей от 40 до 80 км/ч по формуле (2). Для этого за основу взято колесо с толщиной обода 55 мм и длиной окружности по кругу катания колеса 2 880 мм:

$$\omega = V \frac{S/t}{l_{\text{окр}}}, \quad (2)$$

где S – расстояние равное 1 км или 1 000 000 мм; t – время равное 1 ч или 60 мин; V – скорость, км/ч, $l_{\text{окр}}$ – длина окружности по кругу катания колеса 2 880 мм.

Опытным путем установлена соответствующая частота УЧП для заданных оборотов оси в минуту, для этого контактный тахометр ТА-1 прикладывали к центру оси стенда и достигали нужных оборотов, параллельно снимая показания с индикатора УЧП.

Для достоверного моделирования прохождения поездом 1 км на разных скоростях, найдем время его движения на 1 км в секундах dt по (3):

$$dt = \frac{t}{v'}, \quad (3)$$

где t – время (1 ч = 3 600 с); v – скорость, км/ч.

Результаты расчетов оборотов оси стенда в минуту с учетом времени прохождения поезда на 1 км пути приведены в табл. 2.

Таким образом, можно моделировать и имитировать движение по заданному маршруту прохождения кривых, регулировать скорость движения в пути, а также прилагать постоянную среднюю статическую радиальную нагрузку на испытуемый подшипник, соответствующую 98 кН, на шейку оси груженого вагона и временную осевую нагрузку 14 кН, что обеспечивает повышение достоверности стендовых испытаний подшипников.

Исследование роликовых подшипников

В целях исследования цилиндрические подшипники подобраны со следующими характеристиками:

1. На одну шейку оси подобраны подшипники с разницей радиальных зазоров подшипни-

Таблица 2. Основные параметры моделирования скорости

Table 2. Basic parameters of speed modeling

Скорость, км/ч Speed, km/h	Число оборотов оси стенда в минуту Number of revolutions of the stand axis per minute	Частота универсального частотного преобразователя, % Frequency of the universal frequency converter, %	Время на 1 км пути, мин Time per 1 km of the track, min
40	231	15,00	1:30
50	290	18,27	1:12
60	347	20,84	1:00
65	375	22,60	0:55
70	405	24,26	0:51
75	434	25,86	0:48
80	463	27,45	0:45

ков 0,10 мм при допустимой не более 0,03 мм [2]. Увеличение этой разницы приводит к перекосу корпуса буксы и вызывает неравномерное распределение нагрузок по длине роликов.

2. Смазка из подшипника удалена (смазочный материал нужен, чтобы отделить тела качения от дорожек для предотвращения повреждений из-за микропроскальзывания).

3. Приложение нагрузки в точке *A*: *a* – радиальная постоянная в точке 2 – 98 кН; *b* – осевая постоянная – 14 кН; *v* – скорость – 80 км/ч.

С целью исследования подшипника созданы наихудшие условия для роликов и симитирована ситуация, когда смазка достигла температуры каплепадения (пластичная смазка начинает свободно стекать с образованием капель) и дальнейшая работа происходит без смазки. В подшипнике происходит процесс сухого трения.

При достижении слоев жидкости менее 0,1 мкм начинается процесс микропроскальзывания роликов, что ведет к неравномерному распределению нагрузок и подшипник переходит в режим заклинивания. В результате исследования сделан вывод, что температура буксы растет в 2 раза быстрее, чем в случае, когда используется смазка. Подшипники теряют свои механические свойства, что ведет к их **преждевременному** износу и разрушению. В связи резким увеличением температуры до 98 °С дальнейшие испытания были прекращены (рис. 5).

Исследование конических подшипников

Исследование конических подшипников без смазки не проводилось, так как формирование кассетного подшипника производится только на заводе-изготовителе, следовательно, в лабораторных условиях его переформирование

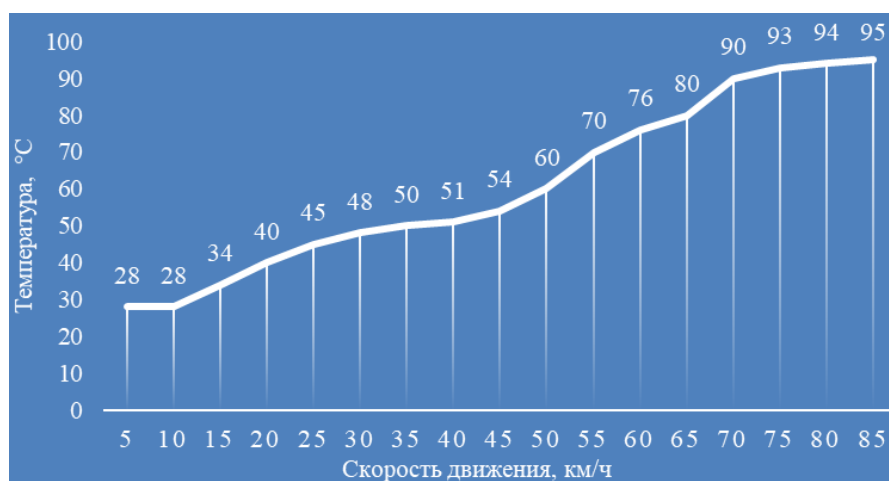


Рис. 5. Данные результатов исследования температуры роликовых подшипников без смазки

Fig. 5. Data from the results of the study of roller bearings temperature without lubrication

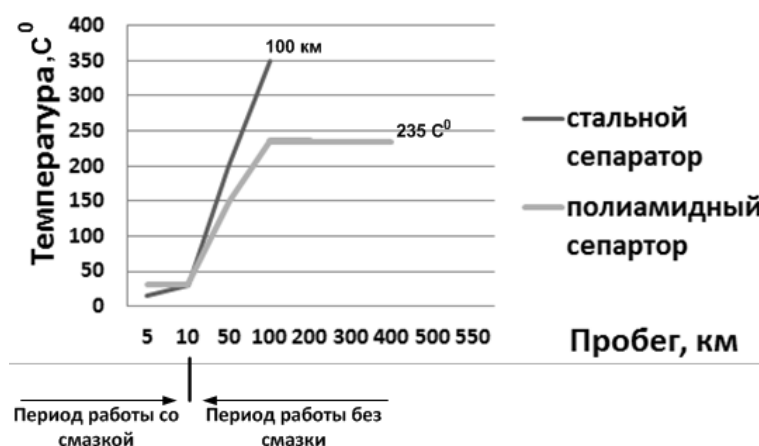


Рис. 6. Результаты проведения тестирования полиамидных и стальных сепараторов без смазки

Fig. 6. Results of testing polyamide and steel separators without lubrication

Таблица 3. Пример моделирования такта и сбора полученных результатов исследования

Table 3. Example of tact modeling and collection of obtained research results

Время t (ч/мин/с) Time t (h/min/sec)	Время dt (ч/мин/с) Time dt (h/min/sec)	Время Dt (ч/мин/с) Time Dt (h/min/sec)	Скорость v , км/ч Speed v , km/h	Путь h , км Distance h , km	Радиусы кривых r , м Curve radii r , m	Температура буксы T_6 , °C Axle box temperature T_6 , °C	Температура окружающей среды T_0 , °C Ambient temperature T_0 , °C	Температура, dT_6 , °C Temperature, dT_6 , °C
00:00:25	00:00:45	00:01:10	80	7 154	0	46,5	20	26,5
00:01:10	00:00:48	00:01:58	75	7 155	549	46,7	20	26,7
00:01:58	00:00:51	00:02:49	70	7 156	0	46,9	20	26,9
00:02:49	00:00:55	00:03:44	65	7 157	0	46,9	20	26,9
00:03:44	00:01:00	00:04:44	60	7 158	392	47	20	27
00:04:44	00:01:12	00:05:56	50	7 159	0	47,3	20	27,3
00:05:56	00:01:30	00:06:26	40	7 160	0	47,3	20	27,3

невозможно. В железнодорожном испытательном центре на территории завода в Нидерландах в 1995 г. проводилось тестирование полиамидных и стальных сепараторов, когда смазка из подшипника была удалена, при этом температура подшипника возросла очень резко, пока не достигла установившегося температурного режима. На этом уровне подшипник продолжал функционировать на протяжении 500 км, после чего тестирование завершилось (рис. 6).

Для испытания конических подшипников необходим счетчик времени (секундомер). На каждом цикле увеличиваем значение на величину шага во времени dt . Таким образом, изменения системы отслеживаются такт за тактом в заданные моменты: t , $t + dt$, $t + 2dt$ (табл. 3).

Заносим данные по времени t в режиме «часы, минуты, секунды» (ч/мин/с), скорости движения подвижного состава v (км/ч), пути h (км), радиусам кривых r (м) в зависимости от скорости движения dt .

Принцип dt является наиболее универсальным, так как применяется для очень широкого класса систем. Он прост в реализации, поскольку совпадает с пониманием человека о времени как о последовательном явлении, текущем с постоянным темпом и позволяет рассмотреть систему в динамике.

Испытания проводятся на стенде (см. рис. 1), который позволяет подать на исследуемый буксовый узел вертикальную нагрузку от веса вагона и осевую нагрузку в направлении оси колесной пары, появляющиеся в эксплуатационных условиях. Испытания основывались на единой режимной карте участка Забайкальской железной дороги с имитацией прохождения кривых различных радиусов, скорости движения по участку и уклонов пути (см. табл. 3).

Заключение

Таким образом, анализ полученных результатов исследований показывает достаточное совпадение значений температуры с реальными показателями с учетом используемой режимной карты. Также необходимо отметить правильность выбора методики моделирования.

Разработка лабораторного стенда позволит исследовать взаимодействие буксового узла с подшипниками различного типа и колеи железной дороги в лабораторных условиях, что при условии точной имитации эксплуатационных условий работы буксовых узлов колесных пар тележек грузовых вагонов обеспечит достоверность результатов стендовых испытаний.

Список литературы

1. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
2. Лapidус Б.М. Задачи опережающего развития российских железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2023. № 2. С. 4–14.
3. Задачи и перспективы развития научных исследований в рамках сотрудничества между ОАО «РЖД» и Российской академией наук / Н.А. Махутов, Б.М. Лapidус, М.М. Гаденин и др. // Железнодорожный транспорт. 2023. № 7. С. 6–11.
4. Вериго М.Ф. Динамика вагонов. М. : ВЗИИЖТ, 1971. 175 с.

5. Коган А.Я., Никитин Д.А., Поleshchuk И.В. Колебания пути при высоких скоростях движения экипажей и ударном взаимодействии колеса и рельса. М. : Интекст, 2007. 168 с.
6. Вершинский С.А., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона. М. : Транспорт, 1991. 360 с.
7. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталеi на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар / В.С. Кушнер, А.А. Крутько, А.А. Воробьев и др. Омск : ОмГТУ, 2015. 224 с.
8. Митин Э.В., Сульдин С.П. Расчет прочности боковой рамы тележки грузового вагона при наложении вертикальной нагрузки // СТИН. 2024. № 10. С. 3–6.
9. Шаньгин Р.В. Надежность рельсов в различных условиях эксплуатации // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 2. С. 2–3.
10. Певзнер В.О., Гринь Е.Н. Совершенствование системы управления техническим обслуживанием пути // Железнодорожный транспорт. 2021. № 2. С. 54–59.
11. Голубев О.В. Повышение эффективности мониторинга рельсовой колеи // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 10. С. 24–28.
12. Конон А.А. Определение собственных частот колебаний элементов железнодорожного пути под поездной нагрузкой и выбор упругих амортизаторов // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 4. С. 57–64.
13. Ермоленко И.Ю., Рогозинская А.Л. Определение динамической нагрузки от колеса на рельс при извилистом движении // Тр. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 4 (53). С. 40–44.
14. О методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта : распоряжение ОАО «РЖД» от 27.12.2007 № 2459р. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
15. Болотин М.М., Воротников В.Г. Отказы и срок службы грузового вагона // Мир транспорта. 2012. Т. 10. № 2. С. 152–161.
16. Петровых В.А., Иванова Т.В., Налабордин Д.Г. Оптимизация назначенного срока службы полувагона по критерию безубыточности эксплуатации // Вагоны и вагонное хозяйство. 2014. № 2. С. 40–42.
17. Введение в математическое моделирование / В.Н. Ашихмин, М.Б. Гитман, И.Э. Келлер и др. М. : Логос, 2005. 440 с.
18. Ковригина И.В., Рожкова Е.А. Влияние на безопасность движения качества ремонта вагонов // Образование – Наука – Производство : материалы III Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2019. Т. 1. С. 36–39.
19. Ковригина И.В. Определение межремонтного ресурса грузового вагона // Наука и образование транспорту. 2017. № 1. С. 45–48.
20. Ермошенко Ю.В., Фомина И.В., Трофимов А.Н. Обобщенные динамические связи, их формы и особенности взаимодействия с объектами вибрационной защиты // Изв. Юго-Западн. гос. ун-та. 2011. № 1 (34). С. 28–37.

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»].
2. Lapidus B.M. Zadachi operezhayushchego razvitiya rossiiskikh zheleznnykh dorog [Tasks of advanced development of Russian railways]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no 2, pp. 4–14.
3. Makhutov N.A., Lapidus B.M., Gadenin M.M., Titov E.Yu. Zadachi i perspektivy razvitiya nauchnykh issledovaniy v ramkakh sotrudnichestva mezhdru ОАО «RZhD» i Rossiiskoi akademiei nauk [Tasks and prospects for the development of scientific research within the framework of cooperation between JSC «Russian Railways» and the Russian Academy of Sciences]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no 7, pp. 6–11.
4. Verigo M.F. Dinamika vagonov [Dynamics of wagons]. Moscow: VZIIzhT Publ., 1971. 175 p.
5. Kogan A.Ya., Nikitin D.A., Poleschuk I.V. Kolebaniya puti pri vysokikh skorostyakh dvizheniya ekipazhei i udarnom vzaimodeistvii kolea i rel'sa [Track fluctuations at high speeds of carriage movement and impact interaction of wheel and rail]. Moscow: Intekst Publ., 2007. 168 p.
6. Vershinskii S.A., Danilov V.N., Khusidov V.D. Dinamika vagona [Dynamics of wagon]. Moscow: Transport Publ., 1991. 360 p.
7. Kushner V.S., Krut'ko A.A., Vorob'ev A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A., Kerentsev D.E. Vliyanie struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh stalei na iznashivanie i rezhimy vosstanovleniya profilya kolesnykh par [The influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on the wear and recovery modes of the profile of wheelsets]. Omsk: OmGTU Publ., 2015. 224 p.
8. Mitin E.V., Sul'din S.P. Raschet prochnosti bokovoi rami telezhki gruzovogo vagona pri nalozenii vertikal'noi nagruzki [Calculation of the strength of the side frame of a freight wagon under vertical load]. *STIN* [Machines. Tools], 2024, no 10, pp. 3–6.
9. Shan'gin R.V. Nadezhnost' rel'sov v razlichnykh usloviyakh ekspluatatsii [Reliability of rails in various operating conditions]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2022, no 2, pp. 2–3.
10. Pevzner V.O., Grin' E.N. Sovershenstvovanie sistemy upravleniya tekhnicheskimi obsluzhivaniem puti [Improvement of the track maintenance management system]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2021, no 2, pp. 54–59.
11. Golubev O.V. Povyshenie effektivnosti monitoringa rel'sovoi kolei [Improving the effectiveness of monitoring the rail track]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2023, no 10, pp. 24–28.
12. Konon A.A. Opredelenie sobstvennykh chastot kolebaniy elementov zheleznodorozhnogo puti pod poezdnoi nagruzkoj i vybor uprugikh amortizatorov [Determination of natural oscillation frequencies of railway track elements under train load

and selection of elastic shock absorbers]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2021, no 4, pp. 57–64.

13. Ermolenko I.Yu., Rogozinskaya A.L. Opredelenie dinamicheskoi nagruzki ot kolesa na rel's pri izvilistom dvizhenii [Determination of the dynamic load from the wheel on the rail during tortuous movement]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University], 2020, no 4(53), pp. 40–44.

14. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 27.12.2007 № 2459r «O metodike opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla i limitnoi tseny podvizhnogo sostava i slozhnykh tekhnicheskikh sistem zheleznodorozhnogo transporta» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 27, 2007 No 2459r «On the methodology for determining the life cycle cost and the limit price of rolling stock and complex technical systems of long-distance transport»].

15. Bolotin M.M., Vorotnikov V.G. Otkazy i srok sluzhby gruzovogo vagona [Failures and service life of a freight wagon]. *Mir transporta* [World of Transport], 2012, no 2, pp. 152–161.

16. Petrovykh V.A., Ivanova T.V., Nalabordin D.G. Optimizatsiya naznachennogo sroka sluzhby poluvagona po kriteriyu bezubytchnosti ekspluatatsii [Optimization of the assigned service life of a gondola wagon according to the criterion of break-even operation]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo* [Wagons and wagon facilities], 2014, no 2, pp. 40–42.

17. Ashikhmin V.N., Gitman M.B., Keller I.E., Stolbov V.Yu., Trusov P.V., Frik P.G. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie [Introduction to mathematical modeling]. Moscow: Logos Publ., 2005. 440 p.

18. Kovrigina I.V., Rozhkova E.A. Vliyanie na bezopasnost' dvizheniya kachestva remonta vagonov [Influence of the quality of wagon repair on traffic safety]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production»]. Chita, 2019, Vol. 1, pp. 36–39.

19. Kovrigina I.V. Opredelenie mezhremontnogo resursa gruzovogo vagona [Determination of the inter-repair resource of a freight wagon]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and education for transport], 2017, no 1, pp. 45–48.

20. Ermoshenko Yu.V., Fomina I.V., Trofimov A.N. Obobshchennye dinamicheskie svyazi, ikh formy i osobennosti vzaimodeystviya s ob'ektami vibratsionnoi zashchity [Generalized dynamic connections, their forms and features of interaction with vibration protection objects]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletins of the Southwestern State University], 2011, no 1 (34), pp. 28a–37.

Информация об авторах

Ковригина Инна Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подвижного состава железных дорог, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; innabella84@mail.ru.

Большаков Роман Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: bolshakov_rs@mail.ru.

Information about the authors

Inna V. Kovrigina, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Transbaikal Institute of Railway Transport – Branch of the Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: innabella84@mail.ru.

Roman S. Bol'shakov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: bolshakov_rs@mail.ru.

Обзор совмещенного движения на высокоскоростных железнодорожных магистралях: мировой и российский опыт

В.В. Кожевников✉

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

✉kozhevnikov@v-vladimir.ru

Резюме

В статье проведен комплексный анализ мировых и отечественных практик проектирования и эксплуатации высокоскоростных железнодорожных магистралей с совмещенным движением – одновременным курсированием высокоскоростных пассажирских и грузовых (контейнерных) поездов. Особое внимание уделено вопросам выбора радиусов круговых кривых при проектных скоростях движения до 400 км/ч и эксплуатационных до 360 км/ч. Актуальность представленной работы обусловлена необходимостью значительного повышения эффективности использования существующей и вновь создаваемой железнодорожной инфраструктуры при обеспечении требований безопасности движения, комфорта пассажиров и экономической целесообразности инвестиций. Основная проблема заключается в потребности технологически грамотного совмещения разнотипных эксплуатационных требований к трассе в условиях смешанного движения с учетом допустимых скоростей следования, степени и характера износа рельсового полотна, обеспечения динамической устойчивости подвижного состава, инженерно-конструктивных ограничений. Кроме того, большое внимание уделяется решению задачи по достижению высокой пропускной способности линии при разнотипном трафике. В работе рассмотрены соответствующие примеры устройства железнодорожных магистралей в других странах – Германии, Франции, Китае, Японии, Испании, Великобритании. Проведено сравнение инженерных, эксплуатационных и экономических характеристик совмещенного и выделенного движения на высокоскоростных магистралях. Обозначены основные факторы, влияющие на выбор радиуса кривых: скорость движения, возвышения и уклоны пути, износ инфраструктуры и подвижного состава, безопасность. По результатам исследования сделан вывод, что на высоконагруженных пассажирских магистралях в России более предпочтительным является выделение отдельных линий для движения поездов различных категорий с возможностью частичного их совмещения в отдельных регионах. Даны рекомендации по применимости тех или иных проектных решений.

Ключевые слова

высокоскоростная магистраль, радиус кривой, совмещенное движение, пассажирский поезд, грузовой поезд, износ рельсов

Для цитирования

Кожевников В.В. Обзор совмещенного движения на высокоскоростных железнодорожных магистралях: мировой и российский опыт / В.В. Кожевников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 35–48. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).35-48.

Информация о статье

поступила в редакцию: 14.04.2025 г.; поступила после рецензирования: 22.04.2025 г.; принята к публикации: 23.04.2025 г.

Review of mixed traffic on high-speed rail lines: global and Russian experience

V.V. Kozhevnikov✉

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation

✉kozhevnikov@v-vladimir.ru

Abstract

The article presents a comprehensive analysis of global and domestic practices in the design and operation of high-speed railways with mixed traffic – the simultaneous circulation of high-speed passenger and freight (container) trains. Special attention is paid to the choice of circular curve radii at design speeds of up to 400 km/h and operational speeds of up to 360 km/h. The relevance of the study is driven by the need to significantly increase the efficiency of both existing and newly developed railway infrastructure while simultaneously ensuring traffic safety, passenger comfort, and the economic feasibility of investments. The core challenge lies in the technologically sound integration of differing operational requirements for the track under mixed traffic conditions – including permissible speeds, the degree and nature of track wear, dynamic stability of rolling stock, engineering and construction constraints, and the need to achieve high line capacity under heterogeneous traffic patterns. The paper reviews examples from Germany, France, China, Japan, Spain, the United Kingdom, and Russia. A comparison is made between the engineering, operational, and economic characteristics of mixed and dedicated traffic on high-speed rail lines. The main factors influencing the selection of curve radii are identified: speed, track gradients, wear of infrastructure and rolling stock, and safety. The study concludes that dedicated lines are preferable for heavily loaded passenger corridors in Russia, while partial mixed-traffic

integration may be feasible in regions with lower traffic volumes involving trains of various categories. Recommendations are provided regarding the applicability of specific design solutions.

Keywords

high-speed railway, curve radius, combined movement, passenger train, freight train, rail wear

For citation

Kozhevnikov V.V. Obzor sovmeshchennogo dvizheniya na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh: mirovoi i rossiiskii opyt [A review of mixed traffic on high-speed railways: international and Russian experience]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 35–48. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).35-48.

Article Info

Received: April 14, 2025; Revised: April 22, 2025; Accepted: April 23, 2025.

Введение

Развитие высокоскоростных магистралей (ВСМ) – ключевое направление модернизации транспортной инфраструктуры в XXI в. Высокая скорость, сокращение времени в пути, рост мобильности населения и повышение конкурентоспособности железных дорог на фоне автомобильного и воздушного транспорта – лишь часть аргументов в пользу ВСМ. Однако масштабное внедрение таких магистралей сопряжено с множеством инженерных и экономических вызовов. Одним из ключевых параметров, определяющих трассу ВСМ, является радиус круговых кривых, от которого зависят допустимая скорость, комфорт и безопасность движения, а также уровень износа пути и подвижного состава.

В условиях ограниченного бюджета, плотной застройки или сложного рельефа часто возникает вопрос о целесообразности совмещенного движения – организации совместного использования трассы как высокоскоростными пассажирскими поездами, так и грузовыми или обычными скоростными составами. Это может снизить затраты на инфраструктуру, повысить ее окупаемость и эффективность, однако потребует компромиссов при проектировании и эксплуатации.

Цель настоящей статьи – провести систематизированный анализ мирового и отечественного опыта совмещенного движения на ВСМ, выделить основные факторы, влияющие на выбор радиуса кривых и сформулировать практические рекомендации для российских условий.

Мировой опыт

Во многих странах ВСМ проектируются специально для движения пассажирских поез-

дов, что позволяет использовать большие радиусы кривых и крутые уклоны продольного профиля без учета тяжелых грузовых составов. Например, на французских линиях LGV минимальные радиусы кривых около 4 000 м, а на новых линиях они достигают 6 000–7 000 м [1]. Эти радиусы рассчитаны под скорость 300–350 км/ч при повышенной боковой устойчивости и комфорте для пассажиров. Соответственно допускаются и большие продольные уклоны: во Франции до 35 ‰, на некоторых немецких ВСМ – до 40 ‰ (линия Кёльн – Франкфурт) [2], что приемлемо для легких пассажирских поездов с мощными приводами, но делает движение тяжелых грузовых составов практически невозможным [3].

Тем не менее ряд стран реализует совмещенное движение, когда по одной линии курсируют как высокоскоростные пассажирские поезда, так и более медленные (тяжелые) поезда (грузовые, ночные и т.д.). Обычно это требует инженерных компромиссов. Германия имеет несколько таких примеров: старые линии Ганновер – Вюрцбург и Мангейм – Штутгарт (проектировались под 250 км/ч) изначально рассчитаны и на грузовое движение. Там выбраны более пологие уклоны (примерно 12,5 ‰) и радиусы порядка 4 000–5 500 м, за счет чего половина трассы проходит по тоннелям и виадукам [4]. Новая немецкая линия Нюрнберг – Ингольштадт со скоростью движения до 300 км/ч также имеет ограничения по движению грузовых поездов: минимальный радиус кривых ≈ 4 085 м, максимальный уклон – 20 ‰ [5]. Благодаря этому ночью по ней могут следовать легкие грузовые составы на скоростях до 160 км/ч [5]. В то же время полностью пассажирская линия Кёльн – Франкфурт (300 км/ч) была проложена с минимальными радиусами

порядка 3 300–3 500 м и уклонами до 40 %, что удешевило строительство, но исключило возможность грузового движения [6].

Опыт Китая во многом схож с европейским: стремительный рост сети ВСМ (более 40 тыс. км) основан на строительстве обособленных пассажирских линий под скорость 300–350 км/ч, с радиусами кривых порядка 7 000 м [2] и уклонами до ≈ 20 –25 %. Тяжелые грузовые поезда при этом перенаправляются на отдельную сеть обычных магистралей. Совмещенное движение на скоростях 350 км/ч в Китае почти не используется – вместо этого развиваются специальные высокоскоростные грузовые поезда. В 2020 г. в Китае разработан высокоскоростной контейнерный поезд со скоростью до 350 км/ч, что существенно сокращает сроки доставки груза и повышает конкурентоспособность железнодорожного транспорта [7]. Такие технологии сглаживают разницу в скоростях между пассажирскими и грузовыми составами, что особенно важно для совмещенного движения. Аналогичные идеи реализуются в Италии: ее новые линии (Рим – Неаполь, Милан – Болонья и др.) построены под скорость 300–350 км/ч с радиусами $\approx 5\,000$ –7 000 м и не используются тяжелыми грузовыми поездами. Однако в 2018 г. запущен сервис Mercitalia Fast – грузовой экспресс на базе переделанного поезда ETR500, следующего по высокоскоростной линии со скоростью ≈ 180 км/ч [8] (т.е. по сути тоже «пассажирский» по своим нагрузкам).

В Испании и Бельгии сеть ВСМ также в основном выделена под пассажирское движение: линии строятся с расчетными скоростями 300–350 км/ч и радиусами порядка 4 000–6 500 м. Однако из соображений эффективности отдельные линии используются совместно. Так, через тоннель под Пиренеями и по участку ВСМ Фигерас – Перпиньян проходят как высокоскоростные поезда, так и грузовые составы (стандарта UIC) – это наиболее прямой маршрут между Испанией и остальной Европой.

В Великобритании линия HS1 (Лондон – Евротоннель) обслуживает Eurostar на 300 км/ч, но по ночам по ней также следуют грузовые поезда из континентальной Европы [9] – при этом уклоны на HS1 не превышают ≈ 25 %, в отличие от французских 35 % на подходах к туннелю.

Япония, напротив, избежала подобных компромиссов благодаря строительству сети

«Синкансэн» стандартной колеи, полностью изолированной от старых линий. Это позволило задать параметры пути только под легкие пассажирские поезда: радиусы круговых кривых 4 000–8 000 м, уклоны до 15 %, отсутствие пересечений с иной инфраструктурой. Грузовое движение на линиях Синкансэн отсутствует в принципе (вся грузовая работа продолжается на раздельной сети колеи 1 067 мм).

Таким образом, мировой опыт показывает, что совмещенное движение на высоких скоростях технически возможно, но применяется относительно редко. Чаще строятся отдельные скоростные линии под пассажирские поезда, а совмещение категорий происходит лишь при особой необходимости, например на труднопроходимых участках или для повышения отдачи от дорогого инфраструктурного объекта [10]. В таких случаях параметры трассы выбираются как компромисс между требованиями высоких скоростей и тяжелого тоннажа.

Российский опыт

В России примеры собственно ВСМ пока ограничены: специализированные линии для скоростей свыше 250 км/ч еще только планируются. **Совмещенное движение** высокоскоростных и обычных поездов реализовано на существующей инфраструктуре, в частности на участке Октябрьской железной дороги Москва – Санкт-Петербург. С конца 2009 г. здесь эксплуатируются поезда «Сапсан» (Velaro RUS) со скоростью до 250 км/ч по общему пути с другими пассажирскими и грузовыми поездами [11]. Этот опыт подтвердил, что есть возможность повышения скоростей на существующей магистрали, однако при этом возникают и проблемы совмещения: для обеспечения 250 км/ч потребовалась модернизация пути (усиление верхнего строения, выпрямление ряда кривых, установка автоблокировки с укороченными блок-участками). Тем не менее ряд участков трассы имеет радиусы менее 2 000 м, что вынуждает скоростные поезда снижать скорость, а отсутствие полной изоляции линии приводит к частым помехам в графике (приоритетное прохождение «Сапсанов» ухудшает пропуск пассажирских пригородных и грузовых составов). Эти сложности стимулировали РЖД к разработке проекта новой выделенной ВСМ Москва – Санкт-Петербург. Согласно специальным техническим условиям, **радиусы кривых** на

ней предусмотрены не менее 7 500 м в сложных местах (для скорости 350 км/ч) и преимущественно $\approx 10\,000$ м для скорости до 400 км/ч [12]. Для сравнения: на действующей линии радиусы кривых на порядок меньше и потому максимальная скорость ограничена ≈ 250 км/ч. Проект ВСМ Москва – Санкт-Петербург предполагает также уклоны не круче 24 ‰ [12] (против существующих уклонов ≈ 10 –12 ‰ на Октябрьской железной дороге), полностью обособленное полотно (двухпутная линия с междупутьем $\approx 4,8$ м) [9] и отсутствие пересечений в одном уровне. Это фактически будет «чистая» высокоскоростная линия для пассажирского сообщения. Грузовые поезда на нее пускать не планируется, хотя обсуждалась возможность запуска по новой трассе легких почтово-грузовых экспрессов в ночное время.

Другой перспективный проект – ВСМ Москва – Нижний Новгород – Казань – изначально рассматривался как чисто пассажирский коридор (скорость 360 км/ч, радиус кривых около 8–10 км). Тем не менее высказывались предложения организовать на нем и скоростные грузовые перевозки, чтобы повысить окупаемость. Речь идет не о движении тяжелых товарных составов, а о контейнерных поездах и экспресс-грузах, способных вписаться в график. На 2025 г. строительство этой линии не начато, но технологии в этой области развиваются. Например, Группа «Синара» совместно с CRRC разрабатывает проект высокоскоростного грузового поезда для российских ВСМ [13]. Пока что в РЖД заявляют, что приоритетом является создание сети пассажирских ВСМ и только после появления нескольких линий появится смысл запускать по ним специализированные грузовые поезда [13]. Таким образом, стратегия России вначале предусматривает раздельное развитие (чтобы не снижать параметры линий под нужды грузов) с последующим возможным частичным совмещением – запуском скоростных грузовых поездов, когда инфраструктура будет готова их принять без ущерба для пассажирского движения.

Стоит отметить, что на длинных протяженных участках Сибири и Дальнего Востока, где пассажиропотоки невелики, концепция совмещенного движения может оказаться востребованной в будущем. Например, планирование организации Евразийского скоростного грузового коридора через территорию России:

обсуждаются проекты железнодорожных магистралей для контейнерных поездов со скоростями 140–160 км/ч (значительно выше нынешних – 90 км/ч на Транссибе). Если такие линии будут строиться, их, вероятно, совместят с пассажирскими скоростными маршрутами регионального значения. Однако максимальные скорости там будут ниже «классических» ВСМ, а радиусы – меньше (в пределах 3–5 км), что технически ближе к концепции ускоренных магистралей двойного назначения.

Технические факторы выбора радиуса и параметров пути

Максимальная скорость движения.

Допустимая скорость в кривой напрямую зависит от ее радиуса и величины возвышения наружного рельса. Чем выше скорость, тем больше должен быть радиус круговой кривой для обеспечения приемлемого центростремительного ускорения [3]. Например, для движения со скоростью 350 км/ч без ощутимого дискомфорта минимальный радиус порядка 7 000 м [2] (при возвышении ≈ 150 мм). Если радиус меньше, приходится снижать скорость или допускать повышенные поперечные ускорения. Поэтому на совмещенных линиях максимальная скорость поездов ограничивается возможностями инфраструктуры: там, где по условиям рельефа невозможно проложить плавные кривые большого радиуса, скорость вынужденно снижается. Так, на совмещенной линии Токио – Осаке (Токайдо Синкансэн, Япония) минимальный радиус $\approx 2\,500$ м. И, хотя по прямым поезда могли бы идти быстрее, фактическая максимальная скорость ограничена ≈ 270 км/ч из-за кривых малого радиуса. В целом, чем выше заданная скорость движения, тем более жесткие требования предъявляются к радиусам поворотов пути.

Комфортабельность поездки. Радиус кривой влияет на уровень поперечного ускорения, воспринимаемого пассажирами. Для высокоскоростных экспрессов обычно лимитируют несбалансированное поперечное ускорение величиной около $0,5$ – $1,0$ м/с² в длительных кривых, чтобы пассажиры не испытывали дискомфорта. Это достигается подбором сочетания радиуса и возвышения наружного рельса. На пассажирских ВСМ допускается большое недостаточное возвышение (например, 100–130 мм сверх рассчитанного на скорость), позволяю-

щее поездам проходить кривые на высокой скорости без недопустимого ухудшения комфорта. Однако на совмещенной линии высокий надбаланс вызывает проблемы для медленных тяжелых поездов, которые в тех же кривых будут испытывать избыток возвышения (т.е. будут как бы «проваливаться» во внутреннюю сторону). Это крайне негативно сказывается на плавности хода грузового состава и устойчивости груза. По этой причине на линиях с совмещенным движением обычно ограничивают величину возвышения и недобаланса до умеренных значений (например, 110–120 мм), даже если при чисто пассажирском движении могли бы применить больше. В итоге пассажирские поезда в таких кривых частично жертвуют комфортом (несколько повышенное значение поперечного ускорения), а грузовые – все равно идут с небольшим избытком возвышения. Такие компромиссные решения, как активный наклон кузова пассажирских вагонов или автоматическая регулировка скоростей грузовых поездов под профиль, могут смягчить проблему, но полностью не устраняют ее. Таким образом, требования комфорта диктуют минимальный радиус и плавность введения кривой (длинные переходные кривые) особенно для линий с пассажирами. Если радиус недостаточно велик, пассажирские поезда должны снижать скорость (ухудшение времени хода) либо терпеть повышенные неудобства – оба варианта нежелательны.

Износ рельсов и колесных пар. Интенсивное вписывание тележек в кривую малого радиуса приводит к повышенным контактным напряжениям между гребнем колеса и головкой рельса. На высоких скоростях это усугубляется динамическими эффектами. Поэтому малые радиусы ускоряют износ как рельсов (боковое нарастание износа на наружном рельсе, контактные усталостные дефекты), так и колесных гребней. Присутствие тяжелых грузовых поездов усиливает проблему: если путь обладает большим уклоном возвышения (рассчитан под скоростные поезда), то медленный грузовой состав идет в избытке возвышения, когда центр тяжести смещен к внутреннему рельсу. Это вызывает неравномерное нагружение рельсов и интенсивный износ низкого (внутреннего) рельса, вплоть до его пластического течения и расплющивания головки [14]. Отмечены случаи разгула колеи и даже выкрашивания внутрен-

них ребер шпал из-за движения тяжелых поездов по переуклоненным путям [14]. Следовательно, совмещенное движение предъявляет повышенные требования к материалам и профилям рельсов (применяют износостойкие закаленные рельсы, частую шлифовку), к обслуживанию (смазка гребней, контролируемое торможение, чтобы не было юза колес на кривой). На чисто пассажирских ВСМ износ тоже есть, но несколько меньший из-за относительно меньшей осевой нагрузки поездов. Кроме того, расстановка путевых смазчиков на кривых и применение каботажных (упругих) рамных узлов тележек позволяют минимизировать износ на радиусах ≈ 4000 м и более, что, конечно, затруднительно реализовать на более тесных кривых.

Динамическая устойчивость и безопасность. Радиусы кривых влияют на динамику движения: на слишком малых радиусах при большой скорости возрастают риски бокового удара гребня о рельс и даже схода состава при превышении критической скорости в кривой. Обычно закладываемый запас прочности и устойчивости таков, что даже при +10–15 % превышения скорости на заданном радиусе не происходит схода, однако это требует ограничивать степень «остроты» кривых. Для высокоскоростных поездов с их низким центром тяжести и жесткой базой тележек боковая устойчивость в плавных кривых обычно не проблема, но вот длинные грузовые составы более чувствительны к комбинации кривых и уклонов. Например, на коротких кривых могут возникать значительные продольные усилия (искривление длинного поезда, особенно при торможении или трогании). Это требует проверки воздушных промежутков автосцепок, ограничения длины тяжелых составов в особо кривых местах и т.п. Также совмещенная линия должна учитывать габарит и центробежный выброс длинного подвижного состава: радиусы и переходные кривые проектируются так, чтобы даже самый длинный вагон не выходил из габарита при максимальной боковой ускоряющей силе. Для безопасного движения в кривых ключевыми факторами являются строгий допуск по уровню и перекосу пути, удержание возвышения в заданных пределах и бесперебойная работа системы сигнализации (АТС/ЕТС), включающая заход поезда в кривую с превышением скорости. Таким образом, чем меньше

радиус кривой на линии, тем выше требования к точности укладки пути и к системе контроля скорости поездов на входе в кривую (риск человеческой ошибки на высоких скоростях нивелируется автоматикой).

Продольный профиль и уклоны. Хотя крутизна уклонов напрямую не связана с радиусом кривой, эти факторы сопряжены в проектировании трассы. На чисто пассажирских ВСМ допустимы уклоны до 35–40 ‰ [2], что упрощает обход препятствий и часто позволяет проложить трассу с более крупными радиусами (так как можно «взбираться» на эстакады или уходить в тоннель с большим подъемом вместо обхода рельефа по долине с малым радиусом кривых). Однако на линии, по которой должны ходить тяжелые грузовые поезда, уклоны ограничивают уровнем $\approx 12\text{--}18\text{ ‰}$ [2], чтобы составы могли преодолевать подъемы. Это, в свою очередь, заставляет обходить возвышенности по более протяженным участкам и закладывать круговые кривые большей кривизны. Таким образом, требование пологих уклонов увеличивает длину трассы и может уменьшать радиусы кривых в стесненных условиях, либо вынуждает строить длинные тоннели и мосты, что ведет к удорожанию проекта. Например, немецкая линия Ганновер – Вюрцбург (смешанное движение) ради снижения уклонов до 12,5 ‰ получила тоннели на 40 % длины [1], но зато сохранила большие радиусы кривых и возможность пропуска грузов. В общем, совмещенное движение требует более пологого профиля, что взаимосвязано с планом трассы и радиусами поворотов.

Сцепление и торможение. В контексте кривых эти факторы проявляются опосредованно. Для тяжелого грузового поезда на крутом уклоне и в кривой может не хватить силы тяги (буксование) или тормозного усилия (риск перегрева тормозов), поэтому крутые спуски/подъемы в сочетании с малым радиусом крайне нежелательны для них. Высокоскоростной же пассажирский поезд имеет распределенный привод и электродинамическое торможение, что позволяет ему уверенно работать даже на уклонах 30–40 ‰. Однако экстренное торможение на кривом участке для него тоже критично: при больших скоростях длина тормозного пути велика и кривизна может повлиять на стабильность (например, из-за неодновременного срабатывания тормозов по составу

или юза колес на рельсах различного уровня). Поэтому радиусы кривых на участках перед опасными местами (станциями, мостами) стараются делать больше, либо оснащают кривые системой контроля за скоростью (бализы, требующие снижения скорости перед крутой кривой, как, например, на подходе к Курскому вокзалу Москвы, где скоростной поезд снижается до 140 км/ч из-за радиуса ≈ 600 м). Для сцепления важно и состояние рельсов: на совмещенных линиях тяжелые поезда могут полировать рельс, ухудшая сцепление для следующих за ними легких составов, или оставлять на катании окалину, масло, что особенно опасно на высоких скоростях и в кривой, поэтому поддержание чистоты и шероховатости рельсов контактной поверхности – еще один технический вызов на совмещенном движении.

Ограничения подвижного состава и инфраструктуры. Длина и масса поездов, габариты, конструкция тележек – все это накладывает ограничения на вписывание в кривые. Длинные составы (например, грузовые поезда длиной 700–1 000 м) требуют очень длинных переходных кривых при входе в поворот, иначе различие в возвышении на головной и хвостовой части поезда приводит к сильному скручиванию рамы и ударным нагрузкам. Также на совмещенных линиях обычно увеличивают ширину колеи в кривых малого радиуса (так называемое уширение колеи), чтобы уменьшить натяг гребней тяжелых вагонов. Высокоскоростные поезда, как правило, имеют относительно более короткую базу между тележками и способны вписываться в кривые радиусом $\approx 7\,000$ м, но для них критичны плавные (гауссовы) переходные кривые длиной не менее нескольких сотен метров. По стандартам, переходная кривая должна обеспечивать прирост возвышения не более ≈ 1 мм на метр пути для комфорта; для скоростей 300+ км/ч это выливается в длины переходных спиралей порядка 200–250 м минимум. Грузовые поезда менее требовательны к плавности (они медленнее), но их наличие не позволяет сократить переходные кривые, а скорее наоборот, может потребоваться еще более пологое нарастание возвышения, чтобы тяжелый состав плавно «встал» в кривую. Поперечные ускорения и вибрации воздействуют и на инфраструктуру: легкий пассажирский поезд на большой кривизне дает относительно

небольшую боковую силу на рельсы, тогда как тяжелый грузовой даже на малой скорости создает значительную боковую составляющую. Следовательно, при совмещении приходится усиливать пути, особенно в кривых (частая рихтовка, более тяжелые шпалы, возможно бетонные, усиленное рельсовое скрепление). Наконец, габаритная ширина подвижного состава: грузовые вагоны шире и выше пассажирских, поэтому на кривых малого радиуса им нужен больший запас расстояния до столбов и сооружений (из-за выброса центра масс наружу кривой). Это учитывается при планировании минимального радиуса: слишком малый радиус может потребовать неприемлемо расширять полосу отвода и расстояние между путями. В итоге технические ограничения подвижного состава и пути в совокупности определяют предельный минимальный радиус на совмещенной линии – обычно порядка 3 500–4 000 м для скорости ≈ 300 км/ч (как на линии Нюрнберг – Ингольштадт) [5]. Если пытаться сделать радиус меньше, придется снижать скорость или вводить специальные меры (наклон кузова, ограничение длины и массы составов и т.п.).

Максимальный радиус круговых кривых

Анализ опыта эксплуатации ВСМ в различных странах свидетельствует о нецелесообразности применения круговых кривых с радиусами более 15 000 м. Согласно [15], максимальный радиус круговой кривой должен быть ограничен 14 000 м, что обусловлено эксплуатационными и техническими факторами. При проектировании новых высокоскоростных железнодорожных линий необходимо учитывать весь жизненный цикл магистрали, поскольку чрезмерно большие радиусы кривых приводят к ряду проблем, включая сложности в текущем содержании пути и увеличение объема ремонтных работ. Малые коэффициенты кривизны затрудняют диагностику и контроль геометрии пути, что в дальнейшем сказывается на эксплуатационных затратах [3].

Поддержание гладкости рельсового пути во многом зависит от качества проектирования, строительства, а также своевременного контроля и ремонта после ввода линии в эксплуатацию. Важным параметром в проектировании является геометрия кривых, определяемая абсолютным значением синус-верзуса (стрелки дуги) или ко-

синус-верзуса (измерения неравных хорд), которые применяются для минимизации динамических нагрузок и обеспечения плавности движения поездов [3].

В настоящее время в Китае поезда, предназначенные для тестирования рельсовых путей, оснащены оборудованием, позволяющим проводить измерения как при нормальной, так и при высокой скорости движения. В условиях обычной скорости и при радиусах кривых $R \leq 8\,000$ м результаты измерений обладают высокой точностью. Однако при $R > 8\,000$ м система автоматически фиксирует отметку «F», что указывает на сомнения в достоверности данных измерений на участках с большими радиусами кривых. Основная проблема заключается в неточности определения местоположения характерных точек, так как при больших радиусах кривых изменения геометрии пути становятся минимальными и трудноразличимыми в разных точках измерения. Это приводит к снижению точности диагностики и возможным ошибкам при интерпретации состояния рельсового пути [15].

На высокоскоростной железнодорожной линии «Гуандун – Шэньчжэнь» имеется множество кривых с большими радиусами в диапазоне 10 000–70 000 м [15], что создает значительные сложности при их обслуживании. Основная проблема заключается в том, что при радиусах свыше 10 000 м и фактическом превышении наружного рельса в 10 мм диагностические системы, используемые для проверки состояния железнодорожного пути, не могут корректно определить, является ли данный участок прямолинейным или кривой. Это приводит к затруднениям при контроле геометрии пути, поскольку программное обеспечение диагностических комплексов не распознает деформации пути, что усложняет своевременное выявление и устранение возможных дефектов. Таким образом, с точки зрения осуществимости ремонта и технического обслуживания, радиус кривой не должен превышать 10 000 м, поскольку это значительно упрощает мониторинг инфраструктуры и повышает точность диагностики состояния рельсового пути.

Для высокоскоростных железных дорог с проектными скоростями 250, 300, 350 и 400 км/ч установлены ограничения по радиусам круговых кривых. Максимальный радиус кривой не должен превышать 15 000 м, поскольку кривые с большими радиусами созда-

ют трудности при диагностике состояния пути и проведении ремонта. Кроме того, для обеспечения оптимального баланса между безопасностью движения, эксплуатационной надежностью и техническим обслуживанием стандартный радиус кривой ограничен 10 000 м. Эти нормативные параметры позволяют поддерживать стабильность пути, минимизировать износ рельсов и колесных пар, а также обеспечивать точность измерений при проверке геометрии пути, что критично для безопасной и эффективной эксплуатации высокоскоростных магистралей.

До строительства высокоскоростных железных дорог в Японии, Франции и Германии возводились экспериментальные участки для испытаний, верификации расчетов и доработки проектов, что снижало риски и уточняло параметры пути. Опыт показал, что для точности геометрии пути на кривых необходимы базисные сваи с шагом 10 м и погрешностью не более 1 мм, что обеспечивает стабильность рельсов, предотвращает деформации и минимизирует износ при движении поездов на высоких скоростях [15].

На испытательных участках высокоскоростных магистралей Франции исследовали оптимальные параметры кривых и предельные скорости движения. На линии «TGV-PSE» (80 км) максимальный радиус кривой 10 000 м позволил тестировать поезда на скорости свыше 345 км/ч, обеспечивая стабильность движения и минимизируя динамические нагрузки. На линии «TGV-A» (66 км) радиусы варьировались от 6 000 до 15 000 м, что позволило провести испытания на скоростях более 350 км/ч. Разнообразие кривых помогло оценить влияние трассы на устойчивость поездов и плавность хода. Итоги испытаний подтвердили эффективность радиусов 10 000–15 000 м для безопасности и комфорта пассажиров, став основой для проектирования новых ВСМ.

На испытательных участках высокоскоростных железных дорог Германии исследовали оптимальные параметры трассы и устойчивость подвижного состава. На линии «Ганновер – Вюрцбург» (26 км) использовались кривые радиусом 5 300, 7 000 и 32 000 м, где был установлен рекорд скорости 345 км/ч. Это позволило изучить влияние геометрии пути на поведение поездов и предельные условия эксплуатации. На линии «Мангейм – Штутгарт» (39 км)

радиусы кривых были нормированы до 5 000 м, что обеспечивало баланс между безопасностью, плавностью хода и техническим обслуживанием. Результаты испытаний подтвердили необходимость соблюдения оптимального диапазона радиусов для стабильности движения, комфорта пассажиров и снижения эксплуатационных затрат [15].

На ранее построенных ВСМ Японии не было жестких ограничений по максимальному радиусу кривых, что позволяло использовать значения свыше 10 000 м. Однако в ходе испытаний новой ВСМ для скорости 350 км/ч было рекомендовано ограничить радиус 8 000 м (с хордой 10 м). Это связано с техническими и эксплуатационными факторами, упрощающими обслуживание и ремонт инфраструктуры.

Для диагностики состояния пути и контактной сети на всех линиях Синкансэн применяется Shinkansen Electric Track Doctor Yellow Type 923 («Желтый Доктор»). Этот специализированный поезд оснащен высокоточным оборудованием, позволяющим контролировать рельсы и контактную сеть в реальном времени. Рабочая скорость диагностики достигает 270 км/ч, что обеспечивает выявление дефектов без значительного замедления движения [16].

Сравнительный анализ: совмещенные и выделенные линии высокоскоростных магистралей

Инженерные аспекты. Совмещенные магистрали требуют более консервативных параметров трассы по сравнению с чисто пассажирскими ВСМ. В частности, радиусы кривых делаются максимально возможными, а уклоны – минимальными, чтобы удовлетворить потребности самого медленного и тяжелого поезда на линии. В итоге трасса получается менее гибкой: ее сложнее вписать в стесненный коридор. Например, полностью выделенная ВСМ может позволить себе отклонение трассы с меньшим радиусом или пойти по более крутому склону, тогда как на совмещенной линии такие отклонения недопустимы без снижения скорости. Так, во Франции новая пассажирская ВСМ в гористой местности может следовать по уклону 35 ‰, а аналогичная линия, рассчитанная на грузовые поезда, вынуждена была бы идти по длинному тоннелю для ограничения уклона $\approx 12\text{--}18\text{ ‰}$ [1].

Как видно, инженерная цена компромисса – более протяженные искусственные сооружения (тоннели, виадуки) и, как правило, большая стоимость строительства совмещенной линии. С другой стороны, такая линия универсальна и может заменить собой две отдельные трассы. Выделенные ВСМ позволяют достичь максимальных скоростей и оптимального профиля для пассажирских поездов, но требуют либо наличия параллельной сети для грузовых, либо отказа от перевозки грузов в данном коридоре.

Кроме геометрии пути, важно устройство путевого развития и стрелочные переводы. На чисто высокоскоростной линии обычно меньше станций и ответвлений – только крупные узлы, оборудованные скоростными стрелками (например, перевод типа 1:26,5 или 1:33, позволяющий сход на 160–230 км/ч). На совмещенных линиях может потребоваться больше соединений с обычной сетью (для того чтобы грузовые поезда заходили на магистраль или сходили с нее), возможно, выделение обгонных путей на станциях для пропуска скоростных поездов мимо медленных. Стрелочные переводы для тяжелых грузовых потоков должны обладать повышенной прочностью (например, закаленные крестовины) – это усложняет конструкцию скоростных стрелок. Часто проблему решают снижением скорости на боковые пути для грузовых составов (например, боковой путь с ограничением 100 км/ч через стрелку, тогда как пассажирский по прямому продолжает движение +300 км/ч). В целом, по инженерной части выделенная ВСМ оптимизирована под однородный трафик, тогда как совмещенная – это всегда компромисс прочности и плавности хода.

Экономические аспекты. Развитие совмещенных линий и отдельных ВСМ имеет как преимущества, так и недостатки с точки зрения экономики. Строительство совмещенной магистрали зачастую дороже в расчете на километр, поскольку требуется соблюдать более строгие параметры трассы (большие радиусы, малые уклоны), а это ведет к удлинению пути и к строительству дополнительных тоннелей, эстакад, укрепленных сооружений. По оценкам, снижение уклонов с 30 до 12 ‰ и увеличение радиусов кривых почти вдвое повышает стоимость строительства на 15–20 % за счет объема земляных работ и искусственных сооружений. Однако при этом совмещенная линия обеспечивает два вида перевозок. Если бы строились

отдельные параллельные линии (пассажирская ВСМ и традиционная грузовая), суммарные затраты были бы значительно выше. Таким образом, в коридорах с невысоким пассажиропотоком совмещение может экономически оправдываться: инвестиции в одну линию окупаются и за счет грузового трафика тоже [10].

Операционные затраты и доходы также отличаются. Выделенная ВСМ, не испытывающая влияния медленных поездов, может поддерживать высокую среднюю скорость движения, что сокращает потребность в подвижном составе (меньше составов и бригад для выполнения расписания). Кроме того, техническое обслуживание пути можно планировать в ночные окна, когда пассажирские поезда не ходят. На совмещенной линии данная возможность отсутствует: если планируется грузовое движение ночью, то окна для ремонта придется назначать короткими фрагментами днем или ранним утром, либо периодически приостанавливать грузовое движение. Это усложняет логистику и может повышать эксплуатационные расходы на содержание инфраструктуры (ночной труд, «вскрытие» пути чаще). С другой стороны, совмещенная магистраль приносит дополнительный доход от грузовых перевозок. В ночные часы, когда пассажиропоток отсутствует, дорогостоящая инфраструктура не простаивает, так как по ней идут грузовые поезда, генерируя выручку и повышая коэффициент использования капитала. Например, на британской HS1 доходы от грузовых операторов пусть и невелики, но снижают расходы на содержание линии. В то же время во Франции по пассажирским ВСМ грузовые поезда почти не ходят, и инфраструктура ночами фактически используется только для профилактики и ремонта. Если пассажиропоток высокий, то выделенная линия окупается за счет пассажиров, если же он умеренный, то добавление грузового трафика может улучшить экономику проекта.

Еще один фактор – износ и ремонт. Совмещенная линия изнашивается быстрее из-за тяжелых осевых нагрузок и частых циклов нагрузок (от грузовых и пассажирских составов). Это ведет к более частому ремонту рельсов, частой подбивке пути, усиленному содержанию контактной сети (тяжелые поезда значительно растягивают контактный провод при проходе). Расходы на электроэнергию тоже могут возрасти, если грузовые поезда тяжелые и

требуют тяговых усилий на подъемах. Выделенная пассажирская линия в этом смысле экономичнее: она рассчитана на легкие поезда, реже нуждается в тяжелом ремонте (например, рельсы могут служить дольше, поскольку нагрузка 17 т/ось против 25 т при грузовых перевозках). Впрочем, при грамотном планировании (ограничение нагрузки на ось грузовых поездов, применение высокопрочных материалов) совмещенная линия может обслуживаться с приемлемыми затратами.

Стоимость подвижного состава косвенно тоже относится к экономическим аспектам. При раздельном движении нужны разные типы поездов для разных линий, а при совмещенном можно унифицировать часть парка. Но на практике различие скоростей столь велико, что и подвижной состав разный: например, на совмещенной линии будут и дорогие высокоскоростные поезда, и обычные локомотивы под груз, поэтому экономии от унификации нет. Скорее наоборот, могут потребоваться специальные локомотивы с повышенной мощностью для езды по крутым уклонам ВСМ (если грузовым все же надо на них идти). В целом же экономическая эффективность совмещенных линий проявляется там, где плотность движения не слишком высока ни в одном из сегментов, в этом случае единая инфраструктура обслуживает оба. Если же пассажирский трафик очень интенсивный (как на токайдо-синкансэне в Японии или линии Париж – Лион во Франции), то любой грузовой поезд будет мешать, и выгоднее строить отдельную линию.

Эксплуатационные аспекты. При совместном ведении быстрого и медленного движений возникают сложности с организацией графика. Пропускная способность линии снижается из-за разницы скоростей: между скоростным и тихоходным поездом приходится держать больший интервал. Для минимизации этого эффекта обычно выделяют «периодические окна» для грузовых составов: например, несколько часов ночью идут только грузовые, днем – только пассажирские. Либо строят раздельные пути на отдельных перегонах (обгонные пункты), где скорый поезд может обойти грузовой. В любом случае, обеспечить столь же частое движение экспрессов, как на чисто пассажирской линии, не получится, так как грузовые «съедают» часть пропускной способности. Надежность графика тоже страдает: поломка или задержка грузового

поезда на совмещенной линии задержит и пассажирские (и наоборот, внештатная ситуация с экспрессом остановит следование грузовых). На выделенной ВСМ эти риски разделены.

Управление движением на совмещенной магистрали гораздо сложнее. Необходимо учитывать разные маршруты и приоритеты: диспетчеризация должна гибко реагировать, чтобы при отклонении графика быстро назначать обгоны либо вводить задержки таким образом, чтобы минимизировать суммарный ущерб. Современные системы (ETCS Level 2/3, диспетчерские центры) в целом способны автоматизированно регулировать смешанный поток, но требования к ним высокие – нужно точно рассчитывать расстояния между поездами с учетом их разной динамики. На выделенных ВСМ все поезда примерно равносторонние, интервал между ними постоянен (например, 5–10 мин) и управление сводится к поддержанию этого такта, поэтому чисто пассажирские линии считаются более надежными в эксплуатации: любая внештатная ситуация окалится в пассажирском сегменте и не влияет на грузовой трафик на других линиях. В то же время, совмещенная линия предоставляет большую гибкость сети: в случае ремонта или аварии на соседней грузовой линии, по ней можно пропустить грузовой поток в обход, что повышает устойчивость всей системы перевозок. Так, если отдельная пассажирская ВСМ закрыта на ремонт, то скоростные поезда приходится или отменять, или переводить на старую линию с сильным увеличением времени хода. Если же линия совмещенная, всегда есть альтернативный вариант пропуска: по тому же пути, хоть и с уменьшенной скоростью. Таким образом, оперативная гибкость выше у совмещенной инфраструктуры, а графиковая устойчивость – у обособленной [17].

Техничность обслуживания – еще один аспект. На выделенной ВСМ обычно установлена единая система сигнализации и связи, ориентированная на высокие скорости (например, кабина локомотива получает сигналы напрямую, как ETCS или TBM). На совмещенных линиях часто приходится поддерживать две системы: современную для скоростных поездов и традиционную для обычных (чтобы грузовые локомотивы без новейшей системы могли двигаться). Это усложняет инфраструктуру и требует двойного комплекта оборудования.

ния (например, и автоблокировка, и радиоблок). Также разнятся требования по электроснабжению: высокоскоростные поезда потребляют большие мощности за короткое время (разгон до 300 км/ч), тогда как грузовые – длительно тянут на подъеме. Энергосистема совмещенной линии должна быть рассчитана на суммарную нагрузку, что может означать более мощные подстанции. На выделенной пассажирской все оптимизировано под расписание экспрессов. Ремонтные «окна» на совмещенной линии, как уже отмечалось, труднее организовать. В итоге эксплуатационно отдельная ВСМ проще и предсказуемее, а совмещенная требует высококласного планирования и управления, но взамен предоставляет универсальность использования.

Уровень комфорта и надежности для разных типов поездов. Пассажиры на выделенных ВСМ получают максимально плавную и быструю поездку. На совмещенных линиях могут быть вынужденные ограничения скорости в некоторых местах, что увеличивает время в пути. Кроме того, присутствие грузовых поездов может снижать комфорт: грузовые чаще создают вибрации пути, от которых страдает плавность хода для следующих за ними экспрессов (особенно если путь не успевают поправить). Разница не критична, но статистика показывает, что на линиях с интенсивным грузовым движением показатели ровности пути хуже, и поэтому даже современные поезда испытывают там больше микроударов. Также важен фактор аэродинамики: при встрече двух высокоскоростных поездов создается сильная ударная волна, ради чего на ВСМ увеличивают междупутное расстояние и ставят ветровые экраны [18], а при обгоне скорым поездом медленного грузового из-за большой разницы скоростей могут возникать турбулентные завихрения вокруг грузового состава, влияющие на проходящий экспресс. Безопасность движения при этом не нарушается, но пассажиры высокоскоростного поезда могут ощутить резкий толчок при обгоне длинного грузового состава. На выделенной линии таких ситуаций нет (поезда обгоняют только стоящие на станциях составы).

Надежность подвижного состава также подвергается разным влияниям. Высокоскоростные поезда, эксплуатируемые на отдельных ВСМ, обычно имеют более мягкие режимы нагрузок – постоянное движение на больших

скоростях, но без частых остановок и экстремально больших тяговых усилий. На совмещенных линиях возможны торможения и разгоны из-за графика (например, догнали грузовой – пришлось притормозить, потом вновь разогнаться), что повышает износ оборудования (тормозных колодок, токоприемников при повторных наборах скорости и т.д.). У грузовых поездов надежность на таких линиях тоже может страдать: им приходится работать на пределе сцепления на подъемах, а при спусках сильнее изнашиваются тормоза. В целом, отдельная специализация линий позволяет оптимально настроить подвижной состав под конкретные условия и поддерживать их, а совмещение – это всегда некоторый компромисс в режимах эксплуатации техники.

По уровню комфорта для грузового сегмента можно отметить, что на выделенной традиционной линии грузовые поезда движутся медленно, но без длинных простоев, тогда как на совмещенной их могут ставить на обочинные пути с целью обгона, что увеличивает время доставки и требует дополнительных маневров. Для скоростных грузовых поездов (контейнерных экспрессов), наоборот, наличие выделенной высокоскоростной линии критично: только тогда они могут реализовать свой потенциал скорости. Если же выпускать их на загруженную обычную сеть, они потеряют время в «пробках». Следовательно, совмещенное движение имеет двоякий эффект: с одной стороны, универсальность, с другой – взаимное влияние, которое может понижать заложенные преимущества высоких скоростей и большой грузоподъемности.

Заключение

Совмещенное движение на ВСМ – сложная, но в определенных случаях оправданная практика. Мировой опыт демонстрирует, что при скорости движения до $\approx 250\text{--}300$ км/ч и умеренных уклонах вполне возможно успешное совмещение пассажирских и грузовых поездов (немецкие и швейцарские новые линии, часть испанских участков). Однако на скоростях 350–400 км/ч требования к пути настолько высоки, что любое включение тяжелых составов ведет к серьезным компромиссам по трассе и эффективности. Большинство стран предпочли строить отдельные ВСМ для пассажирского движения, совмещенные участки делают лишь там,

где без этого не обойтись технически или экономически (горные перевалы, тоннели, мосты, низкий трафик).

Для России с ее огромными расстояниями и высокими объемами грузоперевозок вопрос совмещения особенно актуален. С одной стороны, новые пассажирские ВСМ (Москва – Санкт-Петербург, Москва – Казань и др.) разумно строить по возможности обособленными, чтобы достичь максимального сокращения времени пути и не ограничивать будущий рост пассажиропотока. Такой подход соответствует лучшим мировым практикам и требованиям комфорта и безопасности: отдельная инфраструктура, рассчитанная под скорость 360–400 км/ч, позволит реализовать все современные технологии без оглядки на «медленные» поезда [19]. Одновременно существующая сеть освободится от части пассажирских поездов, что увеличит ее пропускную способность для грузов (например, запуск ВСМ Москва – Санкт-Петербург позволит перераспределить грузопоток на старую линию [20]). Таким образом достигается стратегическое разделение потоков: скоростные пассажирские – по новым линиям, грузовые – по высвобожденным мощностям старых линий. В условиях России, где доля грузового движения очень высока, это представляется целесообразным для основных магистралей.

С другой стороны, совмещенное движение может найти нишу в проектах регионального характера и в скоростной грузовой логистике. Рекомендуются рассмотреть возможность строительства линий двойного назначения там, где пассажиропотоки недостаточны для окупаемости чисто пассажирской ВСМ, но есть потенциальный грузовой спрос (например, коридор Урал – Сибирь, либо международные маршруты «Север – Юг»). На таких линиях разумно ограничить расчетную скорость до 250–300 км/ч, что позволит заложить радиусы $\approx 4\,000$ м и уклоны $\approx 12\text{--}15\%$ – параметры, совместимые с движением легких грузовых поездов без кардинального удорожания проекта [2]. Также перспективно развитие скоростных грузовых поездов (рефрижераторных, почтово-курьерских), способных двигаться со скоростью 160–200 км/ч и вписываться в график пассажирских ВСМ. Их запуск по уже построенным линиям даст синергетический эффект –

увеличит загрузку инфраструктуры и сократит сроки доставки грузов. В то же время движение традиционных тяжеловесных поездов целесообразно сохранить на отдельных путях.

Подводя итог, можно сказать, что для России первоочередной задачей является создание сети выделенных высокоскоростных линий для пассажирского сообщения (Москва – Санкт-Петербург, Москва – Казань и далее до Екатеринбурга, возможна ВСМ в Сибири между крупными агломерациями). Проектирование этих линий должно выполняться с прицелом на максимальные скорости и комфорт (радиусы $\approx 8\,000\text{--}10\,000$ км, уклоны до 25 % и т.д.), без закладывания ограничений под грузовые поезда (последние при необходимости можно будет пустить с пониженной скоростью в ночные окна или по отдельным параллельным путям на сложных участках). По мере развития сети ВСМ следует параллельно модернизировать существующую сеть для ускорения грузовых перевозок (электрификация и повышение скоростей на транзитных коридорах до 120–160 км/ч), что частично компенсирует отсутствие грузов на ВСМ.

В перспективе, когда опорная сеть ВСМ сформируется и технологии высокоскоростного движения будут отработаны, можно вернуться к идее их частичной универсализации. К этому времени появятся специальные образцы грузового подвижного состава под ВСМ (как отмечают в РЖД, такие поезда станут актуальны после ввода второй и третьей линий ВСМ [13]). Тогда станет возможным более широкое совмещенное использование, например отправка контейнерных экспрессов по ночам со скоростью 200 км/ч по маршруту Европа – Китай через Россию. Подобные решения позволят максимально задействовать потенциал инфраструктуры ВСМ без ущерба для основного – пассажирского – трафика. В целом же, исходя из российских условий, рекомендуется придерживаться принципа: «раздельно там, где можно, и совмещенно там, где нужно», т.е. при проектировании новых линий приоритизировать чисто высокоскоростное сообщение, но в обоснованных случаях (низкая загрузка, дороговизна дублера, стратегическая необходимость) закладывать возможность совместного движения, опираясь на международный опыт и современные технические средства для его обеспечения.

Список литературы

1. Трансевропейские высокоскоростные железные дороги. Исследование Генерального плана. Общие сведения, необходимые для дополнительного обоснования требуемых исследований. Этап 2 // UN-iLibrary : site. URL : <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210054973/read> (access date: 31.03.2025).
2. Týfa L. Key Attributes of the High Speed Rail System Project // Transactions on transport sciences. 2008. Vol. 1. Iss. 2. P. 87–94. DOI 10.5507/tots.2008.012.
3. Кожевников В.В. Определение величины радиуса круговых кривых при проектировании высокоскоростных магистралей // Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности : материалы межвуз. науч.-практ. конф. транспортных вузов. СПб., 2023. С. 50–55.
4. Deutschlands längster Eisenbahntunnel // FrankfurterRundschau : site. URL : <https://www.fr.de/rhein-main/deutschlands-laengster-eisenbahntunnel-11676448.html> (дата обращения 31.03.2025).
5. Внедрение новых конструкций безбалластного пути // Железные дороги мира. Путь на плитном основании. 2007. № 2. С. 70–73.
6. Picard J.-F., Beltran A. D'où viens tu TGV? Témoignages sur les origines des trains à grande vitesse français // Archivchemindefer : site. URL : <http://archivchemindefer.free.fr/dossierTGV/DouvienTGV.pdf> (дата обращения 01.04.2025).
7. Кожевников В.В., Целихов Е.О. Грузовые перевозки с использованием высокоскоростных железнодорожных магистралей // Аспирантские чтения : сб. науч. ст. аспирантов РУТ (МИИТ). М., 2021. Вып. 4. С. 106–112.
8. Mercitalia Fast: from October, goods will travel at high speed // Ferrovie dello Stato Italiane : site. URL : <https://web.archive.org/web/20181117233926/https://www.fsitaliane.it/content/fsitaliane/en/Media/press-releases-and-news/2018/4/6/mercitalia-fast--from-october--goods-will-travel-at-high-speed.html> (access date: 01.04.2025).
9. Treno ad alta velocità Le Frece // Interrail eurail : site. URL : <https://www.interrail.eu/it/plan-your-trip/tips-and-tricks/trains-europe/high-speed-trains/le-frecc> (access date: 01.04.2025).
10. Морозова О.С., Шкурников С.В. Опыт совмещенного высокоскоростного пассажирского и грузового движения в странах Европейского союза // Бюллетень результатов научных исследований. 2017. № 4. С. 32–40.
11. Кожевников В.В., Парамонов М.А. Мировой опыт развития высокоскоростных железнодорожных магистралей // Аспирантские чтения : сб. науч. ст. аспирантов РУТ (МИИТ). М., 2021. Вып. 4. С. 112–118.
12. Шкурников С.В., Булакаева О.С., Анисимов В.А. Сложная пространственная геометрия криволинейных участков трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 2. С. 164–178.
13. Грузовые высокоскоростные поезда: нужны ли они? // ROLLINGSTOCK : сайт. URL : <https://rollingstockworld.ru/lokomotivy/gruzovye-vysokoskorostnye-poezda-nuzhny-li-oni/> (дата обращения: 02.04.2025).
14. Rakoczy A.M., Wilson N., Li D. Cant Excess for Freight Train Operations on Shared Track. Washington : Office of Research, Development and Technology, 2020. 52 p.
15. Nunno R. Fact Sheet: High Speed Rail Development Worldwide // Environmental and Energy Study Institute (EESI) : site. URL : <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-high-speed-rail-development-worldwide#:~:text=Japan%3A%20The%20Birth%20of%20High,Rail> (access date: 01.04.2025).
16. Сморчкова К.С., Кожевников В.В. Высокоскоростное железнодорожное сообщение в Японии // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки : материалы VII Всерос. конф. с междунар. участ. М., 2022. С. 171–173.
17. Сидраков А.А. Организация скоростных пассажирских перевозок в дальнем сообщении : дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 182 с.
18. Родченко В.А., Зандарашвили Д.С. Высокоскоростное железнодорожное движение. Мировой опыт и перспективы в России. М. : МГУПС (МИИТ), 2015. 116 с.
19. Поставка первых поездов для ВСМ Москва – Петербург планируется в 2028 году // ТАСС : сайт. URL : https://tass.ru/ekonomika/21878167?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 02.04.2025).
20. Что дадут экономике высокоскоростные магистрали // RGRU : сайт. URL : <https://rg.ru/2023/08/27/chto-dadut-ekonomike-vysokoskorostnye-magistrali.html> (дата обращения: 02.04.2025).

References

1. Trans'evropeiskie vysokoskorostnye zheleznye dorogi. Issledovanie General'nogo plana. Obshchie svedeniya, neobkhodimye dlya dopolnitel'nogo obosnovaniya trebuemykh issledovaniy. Etap 2 [Trans-European Railway High-Speed. Master Plan Study. A general background to support further required studies. Phase 2]. Available at: <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210054973/read> (Accessed March 31, 2025).
2. Týfa L. Key Attributes of the High Speed Rail System Project // Transactions on transport sciences, 2008, Vol. 1, iss. 2, pp. 87–94.
3. Kozhevnikov V.V. Opredelenie velichiny radiusa krugovykh krivyykh pri proektirovaniy vysokoskorostnykh magistralei [Determination of the radius of circular curves in the design of high-speed highways]. *Materialy Mezhevuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii transportnykh vuzov «Sovremennye vyzovy transportnoi otrasli: novye vozmozhnosti»* [Proceedings of the Interuniversity Scientific and Practical Conference of Transport Universities «Modern challenges of the transport industry: new opportunities»]. Saint Petersburg, 2023, pp. 50–55.
4. Deutschlands längster Eisenbahntunnel (electronic resource). Available at: <https://www.fr.de/rhein-main/deutschlands-laengster-eisenbahntunnel-11676448.html> (Accessed March 31, 2025).
5. Vnedrenie novykh konstruktssii bezballastnogo puti [Introduction of new ballast-free track designs]. *Zheleznye dorogi mira. Put' na plitnom osnovani* [Railways of the world. The track is on a slab base], 2007, no 2, pp. 70–73.

6. Picard J.-F., Beltran A. D'où viens tu TGV? Témoignages sur les origines des trains à grande vitesse français (electronic resource). Available at: <http://archivchemindefer.free.fr/dossierTGV/DouviensTGV.pdf> (Accessed April 1, 2025).
7. Kozhevnikov V.V., Tselikhov E.O. Gruzovye perevozki s ispol'zovaniem vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralей [Freight transportation using high-speed railways]. *Sbornik nauchnykh statei aspirantov RUT (MIIT) «Aspirantskie chteniya»* [Proceedings Ph.D. students' of the Russian University of Transport (MIIT) «Ph.D. students readings»]. Moscow, 2021, iss. 4, pp. 106–112.
8. Mercitalia Fast: from October, goods will travel at high speed (electronic resource). Available at: <https://web.archive.org/web/20181117233926/https://www.fsitaliane.it/content/fsitaliane/en/Media/press-releases-and-news/2018/4/6/mercitalia-fast--from-october--goods-will-travel-at-high-speed.html> (Accessed April 1, 2025).
9. Treno ad alta velocità Le Frece (electronic resource). Available at: <https://www.interrail.eu/it/plan-your-trip/tips-and-tricks/trains-europe/high-speed-trains/le-frecc> (April 1, 2025).
10. Morozova O.S., Shkurnikov S.V. Opyt sovmeshchennogo vysokoskorostnogo passazhirskogo i gruzovogo dvizheniya v stranakh Evropeiskogo soyuza [The experience of combined high-speed passenger and freight traffic in the countries of the European Union]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2017, no 4, pp. 32–40.
11. Kozhevnikov V.V., Paramonov M.A. Mirovoi opyt razvitiya vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralей [World experience in the development of high-speed railways]. *Sbornik nauchnykh statei aspirantov RUT (MIIT) «Aspirantskie chteniya»* [Proceedings Ph.D. students' of the Russian University of Transport (MIIT) «Ph.D. students readings»]. Moscow, 2021, iss. 4, pp. 112–118.
12. Shkurnikov S.V., Bulakaeva O.S., Anisimov V.A. Slozhnaya prostranstvennaya geometriya krivolineynykh uchastkov trassy vysoko-skorostnykh zheleznodorozhnykh magistralей [Complex spatial geometry of curved sections of high-speed railway routes]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2022, no 2, pp. 164–178.
13. Gruzovye vysokoskorostnye poezda: nuzhny li oni? (elektronnyi resurs) [High-speed freight trains: are they needed? (electronic resource)]. Available at: <https://rollingstockworld.ru/lokomotiv/gruzovye-vysokoskorostnye-poezda-nuzhny-li-oni/> (April 2, 2025).
14. Rakoczy A.M., Wilson N., Li D. Cant Excess for Freight Train Operations on Shared Track. Washington: Office of Research, Development and Technology, 2020. 52 p.
15. Nunno R. Fact Sheet: High Speed Rail Development Worldwide. Available at: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-high-speed-rail-development-worldwide#:~:text=Japan%3A%20The%20Birth%20of%20High,Rail> (Accessed April 1, 2025).
16. Smorchkova K.S., Kozhevnikov V.V. Vysokoskorostnoe zheleznodorozhnoe soobshchenie v Yaponii [High-speed railway communication in Japan]. *Materialy VII Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya otraslevoi nauki»* [Proceedings of the VII All-Russian Conference with international participation «Current state, problems and prospects of development of branch science»]. Moscow, 2022, pp. 171–173.
17. Sidraikov A.A. Organizatsiya skorostnykh passazhirskikh perevozok v dal'nem soobshchenii [Organization of high-speed long-distance passenger transportation]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2012. 182 p.
18. Rodchenko V.A., Zandarashvili D.S. Vysokoskorostnoe zheleznodorozhnoe dvizhenie. Mirovoi opyt i perspektivy v Rossii [High-speed railway traffic. World experience and prospects in Russia]. Moscow: MGUPS (MIIT) Publ., 2015. 116 p.
19. Postavka pervykh poezdov dlya VSM Moskva – Peterburg planiruetsya v 2028 godu (elektronnyi resurs) [Delivery of the first trains for the Moscow – Petersburg high-speed railway is planned in 2028 (electronic resource)]. Available at: https://tass.ru/ekonomika/21878167?utm_source=chatgpt.com (Accessed April 2, 2025).
20. Chto dadut ekonomike vysokoskorostnye magistrali (elektronnyi resurs) [What high-speed highways will give to the economy (electronic resource)]. Available at: <https://rg.ru/2023/08/27/chto-dadut-ekonomike-vysokoskorostnye-magistrali.html> (Accessed April 2, 2025).

Информация об авторах

Кожевников Владимир Владимирович, старший преподаватель кафедры проектирования и строительства железных дорог, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва; e-mail: kozhevnikov@v-vladimir.ru.

Information about the authors

Vladimir V. Kozhevnikov, Assistant Professor of the Department of Design and Building of Railways, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, e-mail: kozhevnikov@v-vladimir.ru.

Сценарии развития транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД» с целью выявления рисков и эффективности планирования транспортно-логистических услуг

Н.В. Власова✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉natalya.vlasova.76@list.ru

Резюме

В настоящее время росту доходов и конкурентоспособности холдинга «РЖД» способствуют стратегические инициативы транспортно-логистического бизнеса, направленные на повышение его маржинальности, в том числе за счет развития бизнес-единиц в данной сфере, формирования сети современных универсальных грузовых терминалов ОАО «РЖД», внедрения комплексных мер по рационализации существующего бизнеса и выхода на новые сегменты рынка транспортно-логистических услуг. Расширение интегрированной системы продаж сквозных транспортно-логистических услуг в контуре транспортно-логистического бизнеса ведет к увеличению прибыли, стимулированию проактивных продаж на основе маркетинговых программ, высокой эффективности системы сбыта. Реализация транспортно-логистической деятельности производится в соответствии с запросом рынка и ожиданиями клиентов при соответствующем распределении операционных ролей бизнес-единиц. Центр фирменного транспортного обслуживания курирует и координирует работу этих единиц в рамках экосистемы транспортно-логистического бизнеса. Бизнес-единицы транспортно-логистического бизнеса Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом с дочерними и зависимыми обществами реализуют транспортно-логистические услуги, при этом сама дирекция выступает главным оператором по их предоставлению. В статье представлены сценарии развития транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД» с целью выявления рисков и эффективности планирования, а также оказания соответствующих услуг на конкурирующем рынке. Данные сценарии проанализированы с помощью финансовых показателей. В виде «дерева целей» представлена декомпозиция стратегической цели транспортно-логистического бизнеса холдинга «РЖД» на горизонте планирования, что позволит улучшить взаимодействие его бизнес-единиц, повысить эффективность деятельности по предоставлению транспортно-логистических услуг внутри страны и на международном рынке. В свою очередь, это будет способствовать выделению необходимых инвестиционных средств с целью осуществления приоритетных проектов развития, в том числе терминально-складской инфраструктуры, являющейся точками входа и выхода грузов на сеть железных дорог ОАО «РЖД» и базовой составляющей при организации клиентоориентированных сервисов транспортно-логистического бизнеса.

Ключевые слова

транспортно-логистический бизнес, холдинг «РЖД», транспортно-логистические услуги, грузовые перевозки, бизнес-единица транспортно-логистического бизнеса, терминально-складской комплекс

Для цитирования

Власова Н.В. Сценарии развития транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД» с целью выявления рисков и эффективности планирования транспортно-логистических услуг / Н.В. Власова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 49–60. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).49-60.

Информация о статье

поступила в редакцию: 13.03.2025 г.; поступила после рецензирования: 20.03.2025 г.; принята к публикации: 21.03.2025 г.

Development scenarios for the transport and logistics business of the Russian Railways holding company aimed at identifying risks and the effectiveness of planning transport and logistics services

N.V. Vlasova✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉natalya.vlasova.76@list.ru

Abstract

At present, the growth of income and competitiveness of the Russian Railways holding company is facilitated by strategic initiatives of the transport and logistics business aimed at increasing its marginality including through the development of business units in the transport and logistics services segment, the development of modern universal cargo terminals network of Russian Railways, implementation of comprehensive measures to develop existing businesses and enter new segments of the transport and logistics services market. Expansion of the integrated sales system of end-to-end transport and logistics services within the transport and logistics

business leads to increased profits, expansion of proactive sales based on marketing programs, and high efficiency of the sales system. The implementation of transport and logistics activities is carried out in accordance with market demand and customer expectations with the corresponding distribution of operational roles of business units. The Center for Corporate Transport Services supervises and coordinates the activities of business units within the ecosystem of the transport and logistics business. Business units of the transport and logistics business (the Central Directorate for the Management of the Terminal and Warehouse Complex together with subsidiaries and dependent companies) carry out activities to provide transport and logistics services, while the Central Directorate for the Management of the Terminal and Warehouse Complex is the main operator for the provision of terminal and logistics services. In the scientific article author presents scenarios for the development of the transport and logistics business of the Russian Railways holding company in order to identify risks and the effectiveness of planning, as well as the development of transport and logistics services. The presented scenarios for the development of the transport and logistics business are analyzed by financial indicators. The decomposition of the strategic goal of the transport and logistics business of the Russian Railways holding company on the planning horizon is presented in the form of a “tree of goals”, which will allow for increasing the interaction of business units of the transport and logistics business of the Russian Railways holding company, the efficiency of transport and logistics services within the country and on the international market. In turn, this will facilitate the allocation of necessary investment funds for the implementation of priority development projects, including terminal and warehouse infrastructure, which are the entry and exit points for cargo on the railway network of JSC Russian Railways and the basic component for organizing customer-oriented services in the transport and logistics business.

Keywords

transport and logistics business, holding of the company «Russian Railways», transport and logistics services, freight transportation, business unit of the transport and logistics business, terminal and warehouse complex

For citation

Vlasova N.V. Stsenarii razvitiya transportno-logisticheskogo biznes-kholdinga «RZhD» s tsel'yu vyyavleniya riskov i effektivnosti planirovaniya transportno-logisticheskikh uslug [Development scenarios for the transport and logistics business of the Russian Railways holding company with the aim of identifying risks and the effectiveness of planning transport and logistics services]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 49–60. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).49-60.

Article Info

Received: March 13, 2025; Revised: March 20, 2025; Accepted: March 21, 2025.

Введение

Сегодня транспортно-логистический бизнес (ТЛБ) холдинга «РЖД» выполняет важную роль в обеспечении государственных и социальных задач, осуществляя обслуживание государственного заказа и моногородов, а также социальные перевозки и развитие новых территорий. ТЛБ холдинга «РЖД» реализует комплексные логистические услуги с задействованием собственных объектов инфраструктуры, с использованием подвижного состава, с применением решений цифровой трансформации, синергии компетенций транспортно-логистических услуг (ТЛУ) в ключевых грузообрабатывающих регионах.

Главными ограничениями развития ТЛБ являются логистические риски и барьеры для импорто-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 «Восток – Запад») при увеличива-

ющемся спросе на комплексные транспортно-логистические сервисы.

Нивелирование рисков и ликвидация ограничений для развития ТЛБ холдинга «РЖД» в новых условиях экономической деятельности представляется возможным при оценке конкурентных преимуществ и целевых показателей эффективности ТЛБ, использовании формализованной структуры перевозочных процессов, механизмов краткосрочного выбора приоритетной комплексной ТЛУ, интеграции цепей поставок, сокращении логистических издержек и обеспечении роста скорости мультимодальных перевозок.

Для нивелирования рисков и оптимизации издержек ТЛБ холдинга «РЖД» разработан SWOT-анализ. Проанализированы актуальные стратегические документы и направления развития компаний ПАО «ТрансКонтейнер», FESCO, Деловые Линии, АО «Нефтетранссервис», АО «ПГК», ГК «Globaltrans», ООО «Трансойл». При разработке SWOT-анализа учитывались наиболее актуальные рыночные тренды развития ТЛБ, текущее и прогнозируемое состояние внешней и внут-

ренной среды на конец 2025 г., стратегические инициативы конкурентов.

Цель представленного научного исследования заключается в проведении SWOT-анализа нивелирования рисков и оптимизации издержек ТЛБ холдинга «РЖД». Автором разработаны сценарии развития ТЛБ холдинга для выявления рисков и эффективности планирования, а также развития ТЛУ на конкурирующем рынке, что позволит повысить взаимодействие бизнес-единиц ТЛБ холдинга «РЖД», эффективность ТЛУ внутри страны и на международном рынке, что, в свою очередь, способствует выделению необходимых инвестиционных средств на реализацию приоритетных проектов развития.

SWOT-анализ

При разработке SWOT-анализа учитывались наиболее актуальные рыночные тренды развития ТЛБ, текущее и прогнозируемое состояние внешней и внутренней среды на конец 2025 г., стратегические инициативы конкурентов.

Сильные стороны:

1. Объекты железнодорожной инфраструктуры и подвижной состав в собственности бизнес-единиц холдинга «РЖД»: холдинг занимает долю 10 % на рынке вагонов, долю 10 % терминалов на железнодорожной сети, обладает крупным парком специальных контейнеров (60 тыс. ед.).

2. Высокие компетенции в сфере организации комплексных ТЛУ по всем направлениям перевозок: бизнес-единицы холдинга «РЖД» занимают долю 20 % на рынке 3PL-услуг.

3. Возможность «выхода на клиента» за счет организации перевозок на «первой и последней миле» и грузоперевозок «от двери до двери», в частности организацию данных перевозок обеспечивает Центральная дирекция по управлению терминально-складским комплексом (ЦД).

4. Наличие опыта и технических решений для железнодорожных перевозок (например, доставка точно в срок, по расписанию).

5. Наличие в собственности терминальной сети и техники, способной перерабатывать практический любой вид грузов, включая тяжеловесные грузы массой до 100 т.

6. Структура вертикально-интегрированного холдинга «РЖД» с диверси-

фицированным портфелем услуг позволяет сформировать максимально возможное число предложений, включая комплексные услуги для широкого круга клиентов.

Слабые стороны:

1. Разрозненность сбытовой, маркетинговой сети, а также цифровых сервисов взаимодействия с клиентами бизнес-единиц.

2. Отсутствие эффективных механизмов распределения доходов между поставщиками комплексных портфелей ТЛУ.

3. Отсутствие общей интегрированной системы взаимодействия бизнес-единиц с клиентами в рамках ТЛБ холдинга «РЖД».

4. Отсутствие кросс-функционального подхода при формировании кадровых и управленческих ресурсов.

5. Высокий уровень изношенности инфраструктуры терминально-складского комплекса.

6. Необходимость выполнения социальных и государственных задач в большей степени по сравнению со своими ключевыми конкурентами на транспортно-логистическом рынке [1–5].

Возможности:

1. Широкая клиентская база. Долгосрочные отношения с крупнейшими российскими компаниями (внутренний фактор, вероятность реализации высокая).

2. Высокие темпы роста контейнерных перевозок (14 % в год) и возможности расширения доли холдинга «РЖД» в сегменте в связи с уходом международных контейнерных операторов (внешний фактор, вероятность реализации высокая).

3. Дополнительное увеличение внутри-российских железнодорожных перевозок за счет организации перевозок «от двери до двери» (внешний фактор, вероятность реализации высокая).

4. Усиление координации компетенций и ресурсов на рынке ТЛУ за счет создания и управления открытой логистической экосистемой в цифровом формате (внутренний фактор, вероятность реализации средняя).

5. Заключение партнерских соглашений для привлечения частных инвестиций в развитие транспортно-логистических центров (ТЛЦ) (внутренний фактор, вероятность реализации средняя).

6. Увеличение объемов переработки широкой номенклатуры грузов, более полное

обеспечение потребностей региональных органов власти, предприятий мелкого и среднего бизнеса, производственного блока ОАО «РЖД» и дочерних и зависимых обществ (ДЗО) за счет создания разветвленной сети современных универсальных грузовых терминалов (внутренний фактор, вероятность реализации средняя).

7. Перспектива освоения дополнительных грузопотоков на основе последовательного развития пропускных и провозных способностей железнодорожных магистралей (внешний фактор, вероятность реализации средняя) [1–5].

Угрозы:

1. Вероятное образование локальных перевозчиков в новых условиях внешнеэкономической деятельности ввиду освобождения доли рынка иностранных транспортно-логистических компаний, усложнения логистических процессов и роста рынка «e-commerce» (e-commerce, или электронная коммерция – это любая коммерческая деятельность, осуществляемая через интернет) приведет к росту конкуренции в сегменте грузовых перевозок и сокращению доходов холдинга «РЖД» (внешний фактор, вероятность реализации низкая).

2. Наличие инфраструктурных ограничений на Восточном полигоне, что способствует переводу грузопотоков на альтернативные виды транспорта для организации грузоперевозок до пунктов пропуска Дальнего Востока (внешний фактор, вероятность реализации высокая).

3. Снижение объемов государственной поддержки железнодорожных перевозок и бюджетного финансирования программных проектов холдинга «РЖД» (внешний фактор, вероятность реализации низкая).

4. Наличие сильных конкурентов в разных сегментах рынка, что угрожает доле компаний холдинга «РЖД» (внешний фактор, вероятность реализации средняя).

5. Ужесточение таможенного регулирования. Возможность возникновения финансовых потерь от административных штрафов и таможенных платежей, связанных с нарушением таможенных правил (внешний фактор, вероятность реализации средняя).

6. Санкционные ограничения, ведущие к снижению объемов экспортных и транзитных перевозок (внешний фактор, вероятность реализации высокая).

7. Уменьшение спроса на российскую продукцию со стороны западных потребителей

и недостаточный рост торговли с азиатскими странами привел к сокращению экспортных грузоперевозок: в 2024 г. рост внешней торговли со странами, не поддержавшими антироссийские санкции, составил 253 млн т относительно уровня 2023 г. против 197 млн т снижения торговли с другими, преимущественно европейскими странами. Далее прослеживается еще большее падение спроса на российскую продукцию (внешний фактор, вероятность реализации высокая).

8. Неготовность грузовладельцев переходить на логистический аутсорсинг, модель самостоятельной организации цепей поставок и логистического обслуживания российских промышленных предприятий (внешний фактор, вероятность реализации низкая).

9. Зависимость деятельности от присутствующего отраслевого тарифного и антимонопольного регулирования (внешний фактор, вероятность реализации низкая).

10. Потеря конкурентоспособности и снижение эффективности холдинга «РЖД» в связи с нехваткой квалифицированных специалистов, в том числе в удаленных регионах (внутренний фактор, вероятность реализации высокая).

11. Преимущество конкурентов в части предоставления терминально-складских услуг вследствие высокой адаптивности частного бизнеса под конъюнктуру рынка (внешний фактор, вероятность реализации средняя).

12. Доведение уровня изношенности инфраструктурных объектов терминального комплекса ОАО «РЖД» до критического уровня, не позволяющего обеспечить возможность выполнения возложенной на ОАО «РЖД» функции по обеспечению недискриминационного доступа клиентов к инфраструктуре холдинга (внутренний фактор, вероятность реализации низкая).

По итогам проведения SWOT-анализа сформулированы следующие выводы:

1. Тенденции социально-экономического развития Российской Федерации предопределяют глобальные вызовы, с которыми в ближайшей перспективе столкнется транспортный комплекс, а также риски и барьеры дальнейшего эффективного развития холдинга «РЖД».

2. Рост конкуренции на рынке контейнерных перевозок приводит к увеличению барьеров для развития холдинга «РЖД» в одном

из наиболее приоритетных сегментов. Сокращение судозаходов морских контейнерных линий привело не только к увеличению доли на рынке крупных российских контейнерных операторов, таких как ПАО «Трансконтейнер» и FESCO, но и к активизации других перевозчиков на локальных рынках. Также необходимо учитывать потенциальное замедление темпов роста контейнерных перевозок в долгосрочной перспективе, что приведет к дополнительному обострению конкуренции на рынке.

3. Падение рождаемости в стране приведет к борьбе за опытные кадры с повышенным уровнем заработной платы. Невозможность удержания уровня заработной платы высококвалифицированного персонала на конкурентоспособном уровне приведет к «текучке кадров» холдинга «РЖД».

Стратегическая цель ТЛБ холдинга «РЖД» на горизонте планирования – генерация доходов и прибыли путем повышения конкурентоспособности на рынке ТЛУ с соблюдением баланса между интересами бизнеса и государства, полное и качественное удовлетворение потребностей клиентов в ТЛУ, предусматривающая увеличение доли холдинга «РЖД» в сегментах высокодоходных перевозок, роста доли холдинга «РЖД» в сегменте внутрироссийских перевозок.

В рамках стратегии развития ТЛБ холдинга «РЖД» предусмотрены представленные далее сценарии развития [1–4].

Базовый сценарий развития транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД»

Сегодня текущая и прогнозная экономическая ситуация в стране характеризуется замедлением темпов роста промышленного производства, несет, в частности, риски уменьшения объемов работы для холдинга «РЖД».

Холдинг «РЖД» осуществляет деятельность в условиях недостатка инвестиций. При существующем тренде по объемам финансирования отставание в темпах инвестирования и модернизации инфраструктуры приведет к снижению роста перевозок, негативным последствиям для экономики и грузовладельцев. В связи с этим необходимо рассмотреть несколько сценариев развития ТЛБ холдинга с целью генерации доходов и прибыли путем повышения конкурентоспособности на рынке ТЛУ с соблюдением баланса между интересами бизнеса и

государства при полном и качественном удовлетворении потребностей клиентов в ТЛУ.

Базовый сценарий развития ТЛБ холдинга «РЖД» заключается в прогнозировании развития РФ, включающем основные макроэкономические показатели валового внутреннего продукта (ВВП), отражающего рыночную стоимость товаров и услуг и объемов промышленного производства с учетом прогноза инфляции, роста цен в промышленности, секторе услуг, сельском хозяйстве, строительстве, туризме и других сферах экономики. Для экономического развития России необходимо увеличить рост торговли между странами Запада и Азии, что позволит ускорить рост мировой экономики. Негативно на российскую экономику влияют санкции, но создается все больше возможностей перераспределения поставок сырья на развивающиеся рынки. При реализации базового сценария возникает возможность эволюционно развивать ТЛБ холдинга «РЖД» и создавать предпосылки для дальнейшего развития инвестиционной деятельности [5–7].

Грузовые перевозки железнодорожным транспортом в данном сценарии вырастут с 1 425 млн т в 2025 г. до 1 896 млн т к 2036 г. Объем перевозок грузов в контейнерах увеличится с 7,2 млн в двадцатифутовом эквиваленте (ДФЭ) до 13,6 млн. Увеличение грузопотоков произойдет за счет роста перевозок грузов в экспортном сообщении с 510 млн т до 730 млн т, импортных перевозок с 83 млн т до 92 млн т, роста внутренних перевозок с 913 млн т до 982 млн т. Помимо этого, ожидается увеличение транзитных перевозок с 42 млн т до 74 млн т за счет грузов обширной номенклатуры, кроме контейнеров стран из Центральной Азии на фоне сокращения транзита из Азии в Европу [8].

В части модели управления ДЗО базовый сценарий развития ТЛБ холдинга «РЖД» включает модель адаптационной устойчивости базового портфеля услуг. Модель стратегической направленности является бизнес-ориентированной с соблюдением паритета задач государственно-социального характера. Модель управления активами с учетом приоритетности выбора ранее обозначенных моделей предполагает развитие портфеля услуг, оказываемых ТЛБ, широкую интеграцию и развитие коммерческой инфраструктуры, а также формирование международных логистических цепей, подразумевает расширение

существующего портфеля материальных и нематериальных активов холдинга.

Целевой функционал, обеспечивающий достижение поставленных целей, также распределен между Центром фирменного транспортного обслуживания (ЦФТО), ЦМ и ДЗО, входящими в периметр ТЛБ. Существующая операционная модель предполагает распределение функций, при котором ЦФТО осуществляет продажу базовой услуги, тогда как ЦМ и ДЗО самостоятельно разрабатывают стратегии развития, формируют перечень продуктов и услуг и управляют ценовой политикой. Распределение функционала в базовом сценарии опирается на текущую операционную модель, но осуществляется изменение в части усиления координирующей роли ЦФТО при стратегическом планировании развития ТЛБ, декомпозиции целей на уровень бизнес-единиц и контроле исполнения. Также в базовом сценарии предполагается создание системы управления взаимоотношениями с клиентами (CRM). С помощью CRM будет выполняться развитие института клиентских менеджеров с целью организации оказания услуг холдингом «РЖД» в едином цифровом пространстве и формирования консолидированной системы обмена информации о клиентах при интенсификации взаимодействия бизнес-единиц и интеграции ТЛУ [9, 10].

Оптимистический (целевой) сценарий развития транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД»

Оптимистический (целевой) сценарий развития ТЛБ холдинга «РЖД» основывается на прогнозе социально-экономического развития Российской Федерации, включающем показатели, касающиеся значений ВВП и динамики объемов промышленного производства, основанном на соответствующем сценарии Министерства экономического развития РФ. В качестве основных сценарных предпосылок рассматривается возможность формирования турецкого хаба для экспорта российского газа, позитивная динамика экспорта цветных металлов в санкционные страны, общее смягчение санкционной политики против России и быстрый рост мировой экономики с широкими возможностями для расширения российских внешнеторговых потоков [11–13].

Грузовые железнодорожные перевозки в оптимистическом сценарии вырастут с

1 520 млн т в 2025 г. до 1 930 млн т к 2036 г. Объем перевозок грузов в контейнерах увеличится с 7,7 млн ДФЭ до 14,1 млн. Экспортные грузоперевозки увеличатся до 850 млн т, импортные – до 92 млн т, транзитные – до 74 млн т, внутренние – до 982 млн т.

Фактором, способствующим развитию сценария в перспективе до 2030 г, является рост грузопотоков по МТК «Север – Юг» в результате увеличения пропускной способности ключевых маршрутов транспортного коридора. Также предполагается, что увеличение грузопотоков будет осуществляться в связке с наращиванием подвижного состава, в том числе фитинговых платформ для контейнерных перевозок, и с развитием железнодорожной инфраструктуры. Ожидается расширение парка оборудования, совершенствование технологии работы и инвестиции в развитие тыловых терминалов, логистической инфраструктуры МТК «Север – Юг», а также Дальнего Востока и Сибири, применение цифровых технологий для планирования и оптимизации инфраструктурных возможностей.

Целевой функционал между ЦФТО и ДЗО, входящими в периметр ТЛБ, предполагает расширение полномочий ЦФТО по управлению бизнес-единицами, продуктами и услугами. В частности, к функционалу ЦФТО добавляется активная деятельность по проработке вопросов, связанных с формированием органов управления и контроля ДЗО, организацией, планированием и надзором за их работой, а также контроль за внедрением и продвижением новых ТЛУ и оценка эффективности продуктового портфеля [14].

Риск-сценарий развития транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД»

Развитие бизнес-единиц ТЛБ предусматривает риск-сценарий. Предпосылками данного сценария являются формирование замкнутых экономических и политических блоков в результате противостояния США и Китая, интенсивная перестройка глобальных производственно-логистических цепочек, внутриблочная регионализация торговли и дополнительный рост транспортно-логистических издержек, а также снижение трансграничных потоков инвестиций.

Рост совокупных железнодорожных перевозок в данном сценарии ожидается до 1 535 млн т к 2036 г.; увеличение объема пере-

возок контейнеризированных грузов – до 9,2 млн ДФЭ; объем экспортных перевозок – на уровне 518 млн т. Прогнозируется меньший рост внутренних перевозок относительно других сценариев – до 940 млн т. Импортные и транзитные перевозки вырастут до 103 млн т и 60 млн т соответственно [15].

Целевой функционал между ЦФТО и ДЗО, входящими в периметр ТЛБ, в риск-

сценарии ориентирован в первую очередь на осуществление основного вида деятельности по организации железнодорожных грузоперевозок. Предполагается замедление реализации планов по внедрению единых цифровых сервисов и большая разобщенность ДЗО на основе специализации в определенных нишах рынка. Функционал распределен как представлено в табл.

Совокупные финансовые показатели по дочерним и зависимым обществам «РЖД»
в разрезе макроэкономических сценариев
Consolidated financial indicators for subsidiaries and affiliates of Russian Railway
in the context of macroeconomic scenarios

Показатель Indicator	Ед. изм. Units of measurement	2024	2026	2030	2036
Риск-сценарий Risk scenario					
Выручка транспортно-логистического бизнеса Revenue of the transport and logistics business	млрд руб. billion rubles	208,6	273,8	411,9	583,3
EBITDA транспортно-логистического бизнеса EBITDA of the transport and logistics business	млрд руб. billion rubles	83,8	134,6	211,0	265,9
Чистая прибыль транспортно-логистического бизнеса Net profit of the transport and logistics business	млрд руб. billion rubles	37,3	61,1	74,8	138,5
Объем инвестиций транспортно-логистического бизнеса накопленным итогом The volume of investments in the transport and logistics business, cumulative total	млрд руб. billion rubles	80,0	437,8	951,9	1 647,7
Рентабельность по EBITDA EBITDA margin	%	40,17	49,15	51,22	45,59
Рентабельность по чистой прибыли Net profit margin	%	17,90	22,32	18,15	23,74
Чистый долг / EBITDA Net debt / EBITDA	коэффициент coefficient	0,71	1,69	1,6	0,87
ROE	%	15,41	19,31	15,22	14,95
ROIC	%	12,36	11,29	9,00	11,52
Базовый сценарий Baseline scenario					
Выручка транспортно-логистического бизнеса Revenue of the transport and logistics business	млрд руб. billion rubles	210,9	280,8	437,5	638,8
EBITDA транспортно-логистического бизнеса EBITDA of the transport and logistics business	млрд руб. billion rubles	84,9	138,4	225,7	299,8
Чистая прибыль транспортно-логистического бизнеса Net profit of the transport and logistics business	млрд руб. billion rubles	38,2	64,2	86,5	165,6
Объем инвестиций транспортно-логистического бизнеса накопленным итогом The volume of investments in the transport and logistics business, cumulative total	млрд руб. billion rubles	75,6	427,0	949,0	1 717,3
Рентабельность по EBITDA EBITDA margin	%	40,26	49,31	51,59	46,93
Рентабельность по чистой прибыли Net profit margin	%	18,10	22,87	19,78	25,92
Чистый долг / EBITDA	коэффициент	0,68	1,60	1,44	0,51

Net debt / EBITDA	coefficient				
ROE	%	15,68	20,00	16,73	16,48
ROIC	%	12,59	11,77	10,10	12,94
Оптимистичный сценарий Optimistic scenario					
Выручка транспортно-логистического бизнеса Revenue of the transport and logistics business	млрд руб. billion rubles	211,3	283,5	452,2	678,0
EBITDA транспортно-логистического бизнеса EBITDA of the transport and logistics business	млрд руб. billion rubles	85,1	140,0	233,8	320,5
Чистая прибыль транспортно-логистического бизнеса Net profit of the transport and logistics business	млрд руб. billion rubles	38,3	65,4	92,9	182,1
Объем инвестиций транспортно-логистического бизнеса накопленным итогом The volume of investments in the transport and logistics business, cumulative total	млрд руб. billion rubles	75,6	436,0	972,7	1 787,2
Рентабельность по EBITDA EBITDA margin	%	40,28	49,37	51,70	47,26
Рентабельность по чистой прибыли Net profit margin	%	18,12	23,06	20,54	26,86
Чистый долг / EBITDA Net debt / EBITDA	коэффициент coefficient	0,68	1,58	1,33	0,32
ROE	%	15,72	20,28	17,55	17,23
ROIC	%	12,62	11,95	10,69	13,68

Обозначенные сценарии развития ТЛБ характеризуются рассмотренными далее финансовыми показателями [15–17].

Финансовые показатели транспортно-логистического бизнеса

Совокупно ЦМ и ДЗО (в том числе АО «ФГК», АО «ОТЛК ЕРА», АО «РЖД Логистика», АО «РЖД Бизнес Актив» и ТЛЦ «Белый Раст») показывают финансовую устойчивость в базовом сценарии (табл.):

- среднегодовые темпы прироста выручки за 2024–2036 гг. составляют 9,7 %;
- среднегодовая рентабельность по EBITDA – более 48 %;
- среднегодовая рентабельность по чистой прибыли – более 17 %;
- отношение чистый долг/EBITDA не превышает 2,0 [3, 4, 17].

К 2036 г. в рамках риск-сценария ожидается снижение годовой выручки транспортно-логистического блока на 8,7 % относительно показателя базового сценария, а снижение чистой прибыли составит 16,4 %; уровень рентабельности по чистой прибыли снизится до 23,7 % (в базовом сценарии аналогичный показатель – 25,9 %).

В оптимистическом сценарии прирост годовой выручки в 2036 г. относительно базового

сценария составит 6,1 %, а чистой прибыли – 10 %. Рентабельность по чистой прибыли составит 26,9 % [17–21].

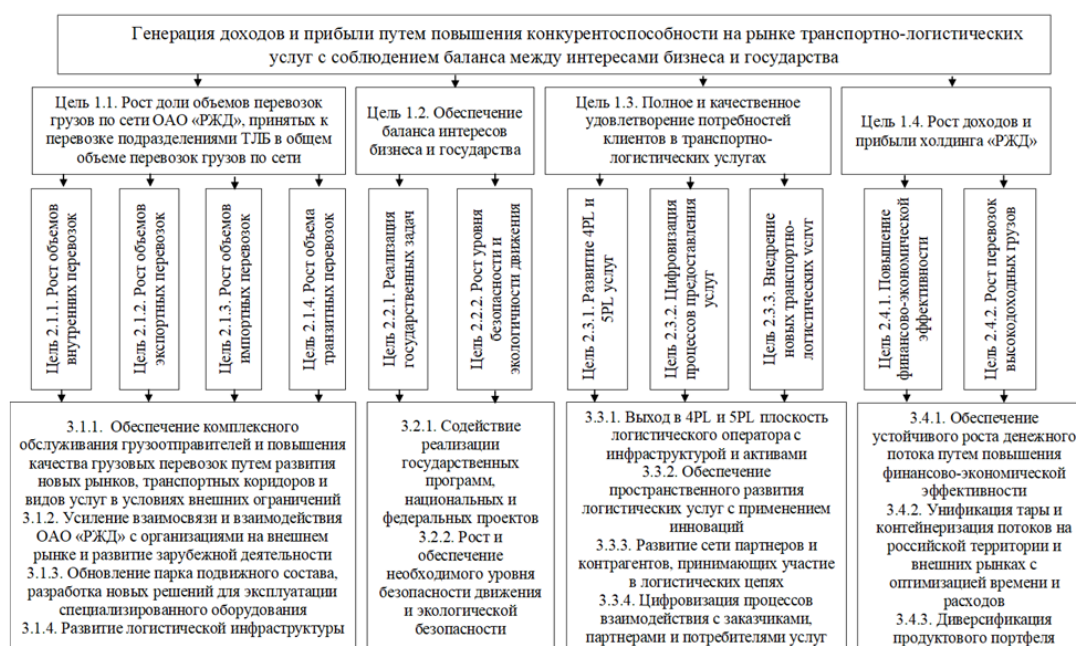
Декомпозиция стратегической цели транспортно-логистического бизнеса холдинга «РЖД» на горизонте планирования представлена в виде «дерева целей» (рис.).

Заключение

По завершении анализа и рассмотрении сценариев развития ТЛБ холдинга «РЖД» можно сделать вывод, что в настоящее время развитие ТЛБ идет по риск-сценарию, так как наблюдается снижение годовой выручки, текущая экономическая ситуация в стране замедляет темпы роста промышленного производства, уменьшаются объемы работы для холдинга «РЖД». Холдинг осуществляет деятельность в условиях недостатка инвестиций, нехватки финансирования в модернизацию инфраструктуры.

Контуrom развития, позволяющим обеспечить наиболее эффективное достижение целей и задач в приведенных сценариях, является скоординированное взаимодействие бизнес-единиц ТЛБ холдинга «РЖД» на основе действующей системы управления.

В рамках текущей модели ТЛБ взаимодействие ДЗО по ряду направлений обеспечивает синергетический эффект. Так, АО «ФГК»,



Дерево целей транспортно-логистического бизнеса холдинга «РЖД»

Tree of goals of the transport and logistics business of the Russian Railways holding

являясь центром компетенций по всему комплексу операций с подвижным составом, предоставляет в аренду другим ДЗО подвижной состав в рамках комплексных ТЛУ. АО «РЖД Логистика» активно взаимодействует с АО «ФГК» и АО «ОТЛК ЕРА» при осуществлении мультимодальных перевозок. АО «РЖД Бизнес Актив» также предоставляет подвижной состав, в частности фитинговые платформы, в пользование другим ДЗО, осуществляет терминально-складские услуги. Кроме того, терминально-складские услуги оказывают ЦМ и ООО «ТЛЦ «Белый Раст».

При этом дополнительную координацию ТЛБ с получением синергетического эффекта будут оказывать:

- усиление координирующей роли ЦФТО;
- развитие принципов взаимной приоритетности, когда в случае привлечения соисполнителя задействуются в первую очередь структуры ТЛБ при условии экономической целесообразности, а в случае отсутствия такой возможности участвует подрядчик с рынка;

– использование принципа «одного окна», курируемого ЦФТО, при реализации стандартизированных ТЛУ, а также создание цифрового канала продаж комплексных логистических сервисов;

– интеграция клиентских баз ДЗО в смежных сегментах и в сегментах, предусматривающих взаимодействие ДЗО, а также применение гибридного формата экосистем в части взаимодействия отдельных бизнес-единиц для создания специализированных ТЛУ.

Достижение целей ТЛБ за счет обеспечения увеличения синергетических эффектов взаимодействия бизнес-единиц ТЛБ холдинга «РЖД» позволит повысить эффективность ТЛУ внутри страны и на международном рынке. В свою очередь, это поспособствует выделению необходимых инвестиционных средств на реализацию приоритетных проектов развития, в том числе терминально-складской инфраструктуры, являющейся точками входа и выхода грузов на сеть ОАО «РЖД» и базовой составляющей для организации клиентоориентированных сервисов ТЛБ.

Список литературы

1. Российские железные дороги // ОАО «РЖД»: офиц. сайт. URL : <http://www.rzd.ru> (дата обращения 03.03.2025).
2. Сценарии развития Восточной Сибири и российского Дальнего Востока в контексте политической и экономической динамики Азиатско-Тихоокеанского региона до 2030 года : аналит. доклад / Л.А. Аносова, А.Г. Коржубаев, А.Н. Панов и др. М. : Едиториал УРСС, 2011. 120 с. URL : <http://econom.nsc.ru/ieie/Izdan/trudi/korjubaev/doklad.pdf> (дата обращения 03.03.2025).

3. Департамент экономической конъюнктуры и стратегического развития (ЦЭКР) // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <http://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=203> (дата обращения 03.03.2025).
4. Рынок логистического аутсорсинга: итоги 2022 г., оценка 2023 г., прогноз 2026 г. // M.A.Research : сайт. URL : <http://ma-research.ru/research/item/395-gynok-logisticheskogo-outsorsinga-itogi-2022-g-otsenka-2023-g-i-prognoz-do-2026-g.html> (дата обращения 03.03.2025).
5. Транспорт // Федеральная служба государственной статистики : офиц. сайт. URL : <http://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения 03.03.2025).
6. Перфильева П.В., Кашкарев А.С., Власова Н.В. Инновационные подходы к совершенствованию качества предоставления услуг клиентам железнодорожного транспорта // Современные инновации в науке и технике : сб. науч. ст. XII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. Курск, 2022. С. 193–196.
7. Капский П.Д., Ивуть Р.Б. Сравнительный анализ потенциала экспедиторов и логистических операторов на рынке транспортно-логистических услуг республики Беларусь // Инновационный транспорт. 2024. № 2 (52). С. 34–36.
8. Власова Н.В., Оленцевич В.А. Совершенствование процессов транспортно-логистического бизнес-блока по реализации проекта предоставления комплекса услуг // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Чита, 2022. Т. 1. С. 262–270.
9. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
10. Власова Н.В. Современные сервисы и услуги, предоставляемые клиентам железнодорожного транспорта в новых экономических условиях // Автомобилестроение : проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства : материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. Ижевск, 2024. С. 108–113.
11. Шпак А.С. Оценка конкурентной позиции транспортно-логистической компании на рынке транспортно-экспедиторских услуг // Право и экономическое развитие: актуальные вопросы. Чебоксары, 2024. С. 67–81.
12. Ефимова Е.Н., Бородин В.А. Экономические аспекты взаимодействия транспортно-логистических центров и перевозчика при реализации контейнерных перевозок // Экономика железных дорог. 2022. № 9. С. 35–42.
13. Кривошекова В.А., Левин А.В., Власова Н.В. Перспективы дальнейшего развития отрасли грузоперевозок железнодорожным транспортом в России // Цифровая экономика: перспективы развития и совершенствования : сб. науч. ст. III Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2022. С. 188–193.
14. Шестакова Е.С., Ашурматова Г.Т., Царегородцева Е.Ю. Транспортная система и ее роль в перевозочном процессе грузооборота // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : сб. ст. X Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов с междунар. участ. Пенза, 2024. С. 333–336.
15. Степанян Т.М. Проблемы совершенствования бизнес-процессов при организации транспортно-логистических услуг // Логистические возможности компаний в современных условиях : сб. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. М., 2019. С. 29–33.
16. Царегородцева Е.Ю. Новые направления в развитии логистической деятельности в современных условиях // Экономика железных дорог. 2024. № 4. С. 29–37.
17. Годовой отчет АО «ОТЛК ЕРА» за 2023 г. // UTLC Eurasian Rail Alliance : сайт. URL : https://annreport2023.utlc.com/UTLC_ERA-AR-2023-rus.pdf (дата обращения 03.03.2025).
18. Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Волкова С.Г. Формирование опорной сети транспортно-логистических комплексов // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : сб. тр. науч.-практ. конф. с междунар. участием. М., 2022. С. 177–183.
19. Динец Д.А., Джавршян А.Г., Шматкова Т.В. Нехватка кадров в новом проекте федерального назначения «БАМ-2» // Экономика и предпринимательство. 2023. № 9 (158). С. 330–335.
20. Меренков А.О., Гришкина А.В. Современное состояние и проблемные вопросы функционирования предприятий транспортно-логистического бизнеса // Экономика строительства. 2024. № 7. С. 85–88.
21. Гуреев П.М. Актуальные вопросы оценки эффективности транспортно-логистического бизнеса на железнодорожном транспорте // Вестник транспорта. 2024. № 1. С. 13–14.

References

1. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed March 3, 2025).
2. Anosova L.A., Korzhubayev A.G., Panov A.N., Vikhanskii O.S., Potapov V.Ya., Ostrovskii A.V., Renzin O.M., Zaverskii S.M., Kononova V.Yu., Filimonova I.V., Eder L.V., Bakhturov A.S., Bezryadin M.V., Kartashov S.V., Mishenin M.V., Nevedeev A.V., Plekhanov D.A., Rasputin M.V., Saunin O.V., Sergeev A.S., Stollyar V.A., Yudin D.V. et al. Stsenarii razvitiya Vostochnoi Sibiri i rossiiskogo Dal'nego Vostoka v kontekste politicheskoi i ekonomicheskoi dinamiki Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona do 2030 goda : analiticheskii doklad [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 : an analytical report]. Moscow: Unitorial URSS Publ., 2011. 120 p. Available at: <http://econom.nsc.ru/ieie/Izdan/trudi/korjubaev/doklad.pdf> (Accessed March 3, 2025).
3. Departament ekonomicheskoi kon'yunktury i strategicheskogo razvitiya (Elektronnyi resurs) [Department of economic conditions and strategic development (Electronic resource)]. Available at: <http://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=203> (Accessed March 3, 2025).
4. Rynok logisticheskogo outsorsinga: itogi 2022 g., otsenka 2023 g., prognoz 2026 g. (Elektronnyi resurs) [Logistics outsourcing market: results 2022, assessment 2023, forecast 2026 (Electronic resource)]. Available at: <http://ma-research.ru/research/item/395-gynok-logisticheskogo-outsorsinga-itogi-2022-g-otsenka-2023-g-i-prognoz-do-2026-g.html>

research.ru/research/item/395-rynok-logisticheskogo-autsorsinga-itogi-2022-g-otsenka-2023-g-i-prognoz-do-2026-g.html (Accessed March 3, 2025).

5. Transport (Elektronnyi resurs) [Transport (Electronic Resource)]. Available at: <http://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (Accessed March 3, 2025).

6. Perfil'eva P.V., Kashkarev A.S., Vlasova N.V. Innovatsionnye podkhody k sovershenstvovaniyu kachestva pre-dostavlenniy uslug klientam zheleznodorozhnogo transporta [Innovative approaches to improving the quality of services provided to railway transport customers]. *Sbornik nauchnykh statei XII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike»* [Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation «Modern innovations in science and technology»]. Kursk, 2022, pp. 193–196.

7. Kapskii P.D., Ivut' R.B. Sravnitel'nyi analiz potentsiala ekspeditorov i logisticheskikh operatorov na rynke transportno-logisticheskikh uslug respublik Belarus' [Comparative analysis of the potential of freight forwarders and logistics operators in the market of transport and logistics services of the Republic of Belarus]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2024, no 2 (52), pp. 34–36.

8. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Sovershenstvovanie protsessov transportno-logisticheskogo biznes-bloka po realizatsii proekta predostavlenniy kompleksa uslug [Improving the processes of the transport and logistics business block for the implementation of a project for providing a range of services]. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem) «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation) «Education – Science – Production»]. Chita, 2022, Vol. 1, pp. 262–270.

9. Rasporiyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»].

10. Vlasova N.V. Sovremennye servisy i uslugi, predostavlyayemye klientam zheleznodorozhnogo transporta v novykh ekonomicheskikh usloviyakh [Modern services and services provided to railway transport customers in new economic conditions]. *Materialy VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Avtomobilestroenie: proektirovanie, konstruirovaniye, raschet i tekhnologii remonta i proizvodstva»* [Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference «Automotive industry: design, construction, calculation and technologies of repair and production»]. Izhevsk, 2024, pp. 108–113.

11. Shpak A.S. Otsenka konkurentnoi pozitsii transportno-logisticheskoi kompanii na rynke transportno-ekspeditorskikh uslug [Assessing the competitive position of a transport and logistics company in the market of transport and forwarding services]. *Monografiya «Pravo i ekonomicheskoe razvitiye: aktual'nye voprosy»* [Monograph «Law and economic development»]. Cheboksary, 2024, pp. 67–81.

12. Efimova E.N., Borodina V.A. Ekonomicheskie aspekty vzaimodeistviya transportno-logisticheskikh tsentrov i perevozchika pri realizatsii konteynernykh perevozok [Economic aspects of interaction between transport and logistics centers and the carrier in the implementation of container transportation]. *Ekonomika zheleznnykh dorog* [Economics of Railways], 2022, no 9, pp. 35–42.

13. Krivoshchekova V.A., Levin A.V., Vlasova N.V. Perspektivy dal'neishego razvitiya otrasli gruzoperevozok zheleznodorozhnym transportom v Rossii [Prospects for further development of the rail freight transportation industry in Russia]. *Sbornik nauchnykh statei III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tsifrovaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya»* [Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference «Digital economy: prospects for development and improvement»]. Kursk, 2022, pp. 188–193.

14. Shestakova E.S., Ashurmatova G.T., Tsaregorodtseva E.Yu. Transportnaya sistema i ee rol' v perevozochnom protsesse gruzooborota [The transport system and its role in the transportation process of cargo turnover]. *Sbornik statei X Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konfe-rentsii molodykh uchenykh i studentov s mezhdunarodnym uchastiem «Innovatsii tekhnicheskikh reshenii v mashinostroenii i transporte»* [Proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students with international participation «Innovations of technical solutions in mechanical engineering and transport»]. Penza, 2024, pp. 333–336.

15. Stepanyan T.M. Problemy sovershenstvovaniya biznes-protsessov pri organizatsii transportno-logisticheskikh uslug [Problems of improving business processes when organizing transport and logistics services]. *Sbornik statei po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Logisticheskie vozmozhnosti kompanii v sovremennykh usloviyakh»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Logistics capabilities of companies in modern conditions»]. Moscow, 2019, pp. 29–33.

16. Tsaregorodtseva E.Yu. Novye napravleniya v razvitii logisticheskoi deyatel'nosti v sovremennykh usloviyakh [New directions in the development of logistics activities in modern conditions]. *Ekonomika zheleznnykh dorog* [Economics of railways], 2024, no 4, pp. 29–37.

17. Godovoi otchet AO «OTLK ERA» za 2023 g. (elektronnyi resurs) [UTLC ERA JSC Annual Report for 2023 (electronic resource)]. Available at: https://annreport2023.utlc.com/UTLC_ERA-AR-2023-rus.pdf (Accessed March 3, 2025).

18. Ivankova L.N., Ivankov A.N., Volkova S.G. Formirovaniye opornoj seti transportno-logisticheskikh kompleksov [Formation of a backbone network of transport and logistics complexes]. *Sbornik trudov nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte»* [Proceedings of the scientific and practical conference with international participation «Innovative technologies in railway transport»]. Moscow, 2022, pp. 177–183.

19. Dinets D.A., Dzhabrshyan A.G., Shmatkova T.V. Nekhvotka kadrov v novom proekte federal'nogo naznacheniya «BAM-2» [Shortage of personnel in the new federal project «BAM-2»]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and entrepreneurship], 2023, no 9 (158), pp. 330–335.

20. Merenkov A.O., Grishkina A.V. Sovremennoe sostoyanie i problemnye voprosy funktsionirovaniya predpriyatii transportno-logisticheskogo biznesa [Current state and problematic issues of functioning of transport and logistics business enterprises]. *Ekonomika stroitel'stva* [Economics of construction], 2024, no 7, pp. 85–88.

21. Gureev P.M. Aktual'nye voprosy otsenki effektivnosti transportno-logisticheskogo biznesa na zheleznodorozhnom transporte [Actual issues of assessing the effectiveness of the transport and logistics business in railway transport]. *Vestnik transporta* [Bulletin of Transport], 2024, no 1, pp. 13–14.

Информация об авторах

Власова Наталья Васильевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: natalya.vlasova.76@list.ru.

Information about the authors

Natal'ya V. Vlasova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: natalya.vlasova.76@list.ru.

Повышение устойчивости и совершенствование функциональных свойств электромеханической системы вспомогательных машин электровоза

Н.Л. Рябченко¹, Л.А. Астраханцев¹✉, В.А. Тихомиров¹, В.В. Немыкина²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

²Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉astrahancev1943@mail.ru

Резюме

На грузовых электровозах однофазного переменного тока напряжением 25 кВ 50 Гц в настоящее время применяется электромеханическая система трехфазных асинхронных вспомогательных машин с электроснабжением от вторичной обмотки собственных нужд тягового трансформатора электровоза. Для преобразования однофазного напряжения используются преобразователь числа фаз с симметрирующими конденсаторами, преобразователь с непосредственной связью частоты и числа фаз с 50 Гц на $16^{2/3}$ Гц. При номинальном напряжении и синусоидальной форме кривой напряжения в обмотке собственных нужд трансформатора оборудование не обеспечивает амплитудную и угловую симметрию трехфазного напряжения на обмотках статора асинхронных электродвигателей вспомогательных машин. Из-за электромагнитной связи тяговых обмоток с обмоткой собственных нужд трансформатора при отклонении напряжения на токоприемнике электровоза и нелинейных искажений напряжения в обмотке собственных нужд система напряжений тока обратной последовательности в обмотках электродвигателей формирует тормозной электромагнитный момент и электродвигатели переходят на неустойчивую ветвь механической характеристики, оказываются в режиме короткого замыкания. В статье методом имитационного моделирования с использованием спектрального FFT-преобразования и разработанной теории электромагнитных, энергетических процессов выполнена оценка предложенных технических решений для улучшения работы электромеханической системы. Совершенствование функциональных свойств системы обеспечивается за счет применения электрического полупроводникового вариатора и автономного трехфазного инвертора для плавного изменения частоты напряжения на обмотках статора электродвигателей и производительности вспомогательных машин.

Ключевые слова

преобразователь, электрическое сопротивление, частота, вспомогательные машины, регулятор мощности, электродвигатель

Для цитирования

Повышение устойчивости и совершенствование функциональных свойств электромеханической системы вспомогательных машин электровоза / Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев, В.А. Тихомиров, В.В. Немыкина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 61–73. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).61-73.

Информация о статье

поступила в редакцию: 30.05.2025 г.; поступила после рецензирования: 09.06.2025 г.; принята к публикации: 10.06.2025 г.

Increasing the stability and improving the functional properties of the electromechanical system of auxiliary machines of an electric locomotive

N.L. Ryabchenok¹, L.A. Astrakhantsev¹✉, V.A. Tikhomirov¹, V.V. Nemykina²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg, the Russian Federation

✉astrahancev1943@mail.ru

Abstract

Single-phase alternating current electric freight locomotives with a voltage of 25 kV and 50 Hz currently use an electromechanical system of three-phase asynchronous auxiliary buses with power supply from the secondary own needs winding of the electric locomotive's traction transformer. To convert a single-phase voltage, a phase number converter with symmetrical capacitors and a converter with direct frequency and phase coupling from 50 Hz to $16^{2/3}$ Hz are used. At the rated voltage and the sinusoidal shape of the voltage curve in the transformer's own needs winding, the equipment does not ensure the amplitude and angular symmetry of the three-phase voltage on the stator windings of asynchronous electric motors of auxiliary machines. Due to the electromagnetic coupling of the traction windings with the transformer's own needs winding, when the

voltage on the electric current collector is deflected and the voltage in the winding of its own needs is nonlinear, the voltage system and the reverse current in the windings of electric motors form a braking electromagnetic moment and the electric motors switch to an unstable branch of the mechanical characteristic turning to the short circuit mode. In the article, the proposed technical solutions for improving the operation of an electromechanical system are evaluated by means of the method of simulation modeling using the spectral FFT transformation and the developed theory of electromagnetic and energy processes. The improvement of the functional properties of the system is ensured through the use of an electric semiconductor variator and an autonomous three-phase inverter to smoothly change the voltage frequency on the stator windings of electric motors and the performance of auxiliary machines.

Keywords

converter, electrical resistance, frequency, auxiliary machines, power controller, electric motor

For citation

Ryabchenok N.L., Astrakhansev L.A., Tikhomirov V.A., Nemykina V.V. Povyshenie ustoichivosti i sovershenstvovanie funktsional'nykh svoystv elektromekhanicheskoi sistemy vspomogatel'nykh mashin elektrovoza [Increasing the stability and improving the functional properties of the electromechanical system of auxiliary machines of an electric locomotive]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 61–73. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).61-73.

Article Info

Received: May 30, 2025; Revised: June 9, 2025; Accepted: June 10, 2025.

Введение

Железнодорожный транспорт выполняет серьезные стратегические задачи государства, касающиеся потребностей населения страны, товарного рынка, перевозочного процесса. В контексте масштабной деятельности отрасли важнейшее значение имеет инновационное развитие одного из направлений этого ряда – энергосберегающих технологий в сфере производства и эксплуатации тягового подвижного состава [1]. Государственная стратегия «Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 г.» определяет наиболее перспективные области развития науки и технологий, обеспечивающие реализацию конкурентных преимуществ России [2]. Утвержденные стратегические инициативы реализуют инновационный путь развития на основе разработки и внедрения технических и технологических решений с наибольшим мультипликативным эффектом. Этот эффект должен обеспечить значительный рост производительности транспортных работ, повышение эффективности использования ресурсов отрасли и локомотивного комплекса в целом. За счет непрерывного наращивания тяжеловесного и скоростного движения по железнодорожным магистралям, формирования сдвоенных и длиннооставных поездов, а также применения современных технологий пропуска транспортно-логистический комплекс Российской Федерации должен обеспечивать провозную способность до 180 млн т в год [3, 4]. В условиях вы-

сокой интенсивности движения на линии с сокращением интервалов между поездами до 5–10 мин [5] к оборудованию локомотива предъявляются высокие требования по обеспечению устойчивой работы узлов с применением «горячего» резервирования, а также по совершенствованию функциональных свойств. В настоящее время грузовые электровозы однофазного переменного тока напряжением 25 кВ 50 Гц [6] укомплектованы системой преобразования числа фаз (СПЧФ) с симметрирующими конденсаторами и преобразователями числа фаз (ПЧФ) и частоты с непосредственной связью 50/16²/₃ Гц. К секционированной обмотке собственных нужд подсоединены две пары встречно включенных тиристорных ПЧФ [7]. Даже при номинальном напряжении и синусоидальной форме кривой напряжения в обмотке собственных нужд трансформатора оборудование не обеспечивает амплитудную и угловую симметрию трехфазного напряжения на обмотках статора электродвигателей асинхронных вспомогательных машин (АВМ) [8, 9]. Тяговые обмотки и обмотка собственных нужд размещены на магнитопроводе тягового трансформатора электроподвижного состава и электромагнитно связаны. Во время работы тягового электропривода при отклонении напряжения на токоприемнике электровоза кривая напряжения в обмотке собственных нужд искажается и отклоняется действующее напряжение от номинальной величины. На выходных клеммах ранее указанных преобразователей формируется

несинусоидальная трехфазная несимметричная система напряжений, токов. В трехфазных обмотках электродвигателя под действием системы напряжения тока обратной последовательности создается тормозной электромагнитный момент и возрастает вероятность ухода машины в работу на неустойчивую ветвь механической характеристики. В режиме короткого замыкания электродвигателя выплавляются обмотки ротора, статора и интенсивно сокращается ресурс диэлектрической прочности изоляции токоведущих проводников.

Целью данной работы является повышение устойчивости электромеханической систе-

мы вспомогательных машин электровоза, разработка технических решений для расширения ее функциональных свойств и обеспечения дальнейшего увеличения производительности транспортных работ.

Постановка задачи исследования

Разработку технических решений для улучшения работы электромеханической системы вспомогательных машин целесообразно выполнять с помощью предложенной теории электромагнитных и энергетических процессов [10, 11], а также целевой функции совершенствования образовательного процесса подготов-

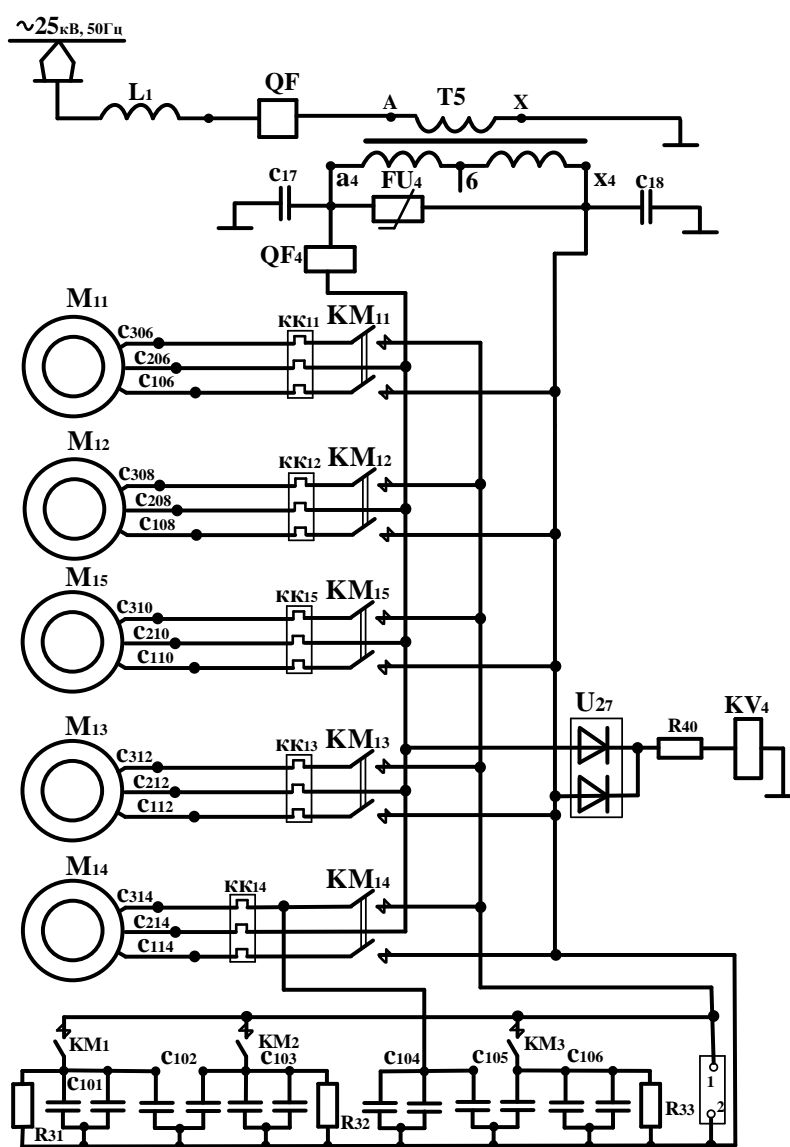


Рис. 1. Принципиальная схема электромеханической системы вспомогательных машин с системой преобразования числа фаз секции электровоза

Fig. 1. Schematic diagram of the electromechanical system of auxiliary machines with the system for converting the number of phases of an electric locomotive section

ки инженеров электротехнических специальностей [12] с максимальным использованием проверенного на практике оборудования (рис. 1) [6].

Номинальное действующее напряжение на выводах a_4 , x_4 обмотки собственных нужд однофазного тягового трансформатора Т5 405 В. Через контакты двухполюсных магнитных пускателей КМ₁₁–КМ₁₅ напряжение с выводов a_4 – x_4 и смещенное по фазе симметрирующими конденсаторами C_{101} – C_{106} напряжение может быть подано на трехфазные обмотки статора асинхронных электродвигателей мотор-вентиляторов М₁₁, М₁₂, М₁₃ и мотор-компрессора М₁₄ типа НВА-55, мотор-насоса М₁₅ с номинальным действующим линейным напряжением 380 В 50 Гц для получения вращающегося магнитного поля в сердечнике статора электродвигателей. Руководством по эксплуатации [6] предусмотрен прямой пуск мотор-вентиляторов М₁₁, М₁₂, мотор-насоса М₁₅ и пуск мотор-компрессора М₁₄ подачей однофазного напряжения 405 В 50 Гц. Величина пусковых токов достигает 5–7 кратного превышения номинального действующего несимметричного линейного тока, а величина напряжения в обмотке собственных нужд значительно отклоняется от номинального напряжения. По мере разгона электродвигателей напряжение на выводах a_4 – x_4 увеличивается и контролируется с помощью однофазного выпрямителя U_{27} , промежуточного реле контроля напряжения KV_4 , настроенное на напряжение включения 300 В + 50 В, для отключения симметрирующих конденсаторов КМ₁–КМ₃. Во время работы тягового электропривода и выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) электровоза нелинейные искажения напряжения в тяговых обмотках передаются электромагнитным путем в обмотку собственных нужд трансформатора. При снижении величины нелинейных искажений однофазного напряжения формируется несимметричное трехфазное с нелинейными искажениями напряжение на обмотках статора асинхронных электродвигателей, поэтому машины работают неустойчиво [13], так как зачастую вращающий электромагнитный момент является пульсирующим и может снижаться до величины меньше критического момента. Целесообразность плавного регулирования производительности мотор-вентиляторов электровоза подтверждается

возможностью устранения инея на поверхности изоляции обмоток тяговых электродвигателей в период эксплуатации при отрицательных температурах воздуха и повышением диэлектрической прочности изоляции, энергосбережением [14–16] и обеспечением работы электродвигателей на устойчивой ветви механической характеристики [17].

Разработка технических решений по совершенствованию функциональных свойств электромеханической системы вспомогательных машин электровоза

В соответствии с целевой функцией образовательного процесса подготовки инженеров электротехнических специальностей [18] при разработке совершенствования электромеханической системы вспомогательных машин целесообразно повышать напряжение в контуре однофазного переменного тока и в промежуточном контуре постоянного тока для снижения потерь электрической энергии и для обеспечения двухполярной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) трехфазного симметричного напряжения на выходе автономного инвертора напряжения (АИН) [19]. В обмотке собственных нужд тягового трансформатора грузового электровоза однофазного переменного тока действующее напряжение $U_{CH} = 405$ В. Среднее значение выпрямленного напряжения U_d однофазного мостового выпрямителя [19], собранного на диодах:

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{mCH} \sin \omega t d\omega t = \\ &= \frac{\sqrt{2} \cdot U_{CH}}{\pi} (-\cos \omega t) \Big|_0^{\pi} = \\ &= \frac{2\sqrt{2} \cdot U_{CH}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot 405 = 364,8 \text{ В.} \end{aligned}$$

Номинальное трехфазное линейное напряжение в обмотках статора трехфазного асинхронного электродвигателя типа НВА-55 $U_L = 380$ В 50 Гц. Трехфазное напряжение формируется IGBT-транзисторами АИН и выполняется регулирование частоты, величины трехфазного напряжения в обмотках статора для управления производительностью мотор-вентиляторов электровоза. Зависимость действующего значения линейного напряжения U_L в трехфазной электрической цепи АВМ от среднего значения напряжения в контуре постоянного тока U_d можно получить из выражения:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} U_{mI} \cos \omega t d\omega t = \\
 &= \frac{3\sqrt{2}U_L}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \cos \omega t d\omega t = \\
 &= \frac{3\sqrt{2}U_L}{\pi} \cdot \sin \bigg|_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} = \\
 &= \frac{3\sqrt{2} \cdot U_{CH}}{\pi} = \frac{3\sqrt{2} \cdot 380}{\pi} = 513,4 \text{ В.}
 \end{aligned}$$

В контуре постоянного тока АВМ необходимо повышать напряжение с $U_d = 364,5 \text{ В}$ до $U_d = 513,4 \text{ В}$, а также в соответствии с предложенной теорией электромагнитных и энергетических процессов [18] можно снижать величину тока в контурах системы для сокращения потерь активной мощности в оборудовании. В контуре постоянного тока силовой электрической цепи известных активных корректоров коэффициента мощности (ККМ) необходимо применять [20–22] дроссели, импульсные суперконденсаторы, силовой транзисторный (тиристорный) ключ (СТК) для уменьшения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока КИ и повышения коэффициента мощности КМ. В известных технических решениях повышение коэффициента мощности достигается за счет снижения коэффициента гармонических составляющих тока и за счет увеличения потерь активной мощности в составе полной мощности оборудования. В данном исследовании предложено увеличить постоянное напряжение на промежуточном емкостном накопителе энергии и на входе АИН с помощью однофазного автотрансформатора на входе однофазного выпрямителя (рис. 2) и таким образом повысить коэффициент мощности системы. Так как напряжение в контуре постоянного тока необходимо повысить на величину $\Delta U = 513,4 - 364,5 = 148,9 \text{ В}$, то на выходе автотрансформатора действующее напряжение равно: $148,9/0,9 = 165 \text{ В}$. Для повышения напряжения можно применить автотрансформатор 405/165 В мощностью $SAT = 30 \text{ кВА}$. Действующее переменное напряжение на входе однофазного мостового выпрямителя: $405 + 165 = 570 \text{ В}$.

Электродвигатель M_{11} , M_{12} мотор-вентиляторов НВА-55 активная мощность на валу 55 кВт, линейное напряжение 380 В, ча-

стота 50 Гц, линейный ток 113 А, частота вращения вала 1 440 об/мин, коэффициент мощности 0,82, коэффициент полезного действия (КПД) 90,2 %. Соединение фаз обмотки – Y, степень защиты по ГОСТ 17494-87 – IP21. Класс изоляции по ГОСТ 8865-93 – F. Режим работы по ГОСТ 183-74-S1, масса 380 кг [23].

Электрический полупроводниковый вариатор содержит однофазный мостовой выпрямитель, собранный на диодах, к шинам выпрямленного напряжения через линейную индуктивность L присоединен промежуточный емкостный накопитель C электрической энергии [11]. Отбор энергии от накопителя и выпрямителя производится трехфазным АИН. К выходным клеммам АИН через контакты трехфазных электромагнитных пускателей КМ₇, КМ₈, КМ₉ присоединены трехфазные обмотки статора электродвигателей M_{11} , M_{12} мотор-вентиляторов и электродвигателя M_{15} мотор-насоса. Автотрансформатор и электрический полупроводниковый вариатор присоединены через электронные ключи к обмотке собственных нужд трансформатора TV и обеспечивают необходимый уровень постоянного напряжения U_C на входе трехфазного АИН на всем интервале регулирования мощности электропривода. Вентиляционная система электровоза применяется для охлаждения силового электрооборудования и создания избыточного давления 40–60 Па воздуха в кузове электровоза с целью защиты от проникновения пыли и снега во время движения. Вентиляционная система оснащена центробежными вентиляторами Ц9-37,6-7,6 [6]. При частоте вращения рабочего колеса вентилятора 1 440 об/мин момент сопротивления на валу электродвигателя равен $M_C = 206,9 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Тяговый трансформатор ОНДЦЭ-4350-25 с номинальной мощностью первичной обмотки 4 350 кВА, номинальным напряжением 25 кВ имеет двухсекционную обмотку собственных нужд мощностью 201 кВА и номинальное напряжение 405 В.

Оценка электромагнитных и энергетических процессов в электромеханической системе асинхронных вспомогательных машин

Параметры оборудования введены в имитационную модель системы (рис. 3), разработанную с применением программы Matlab в среде Simulink.

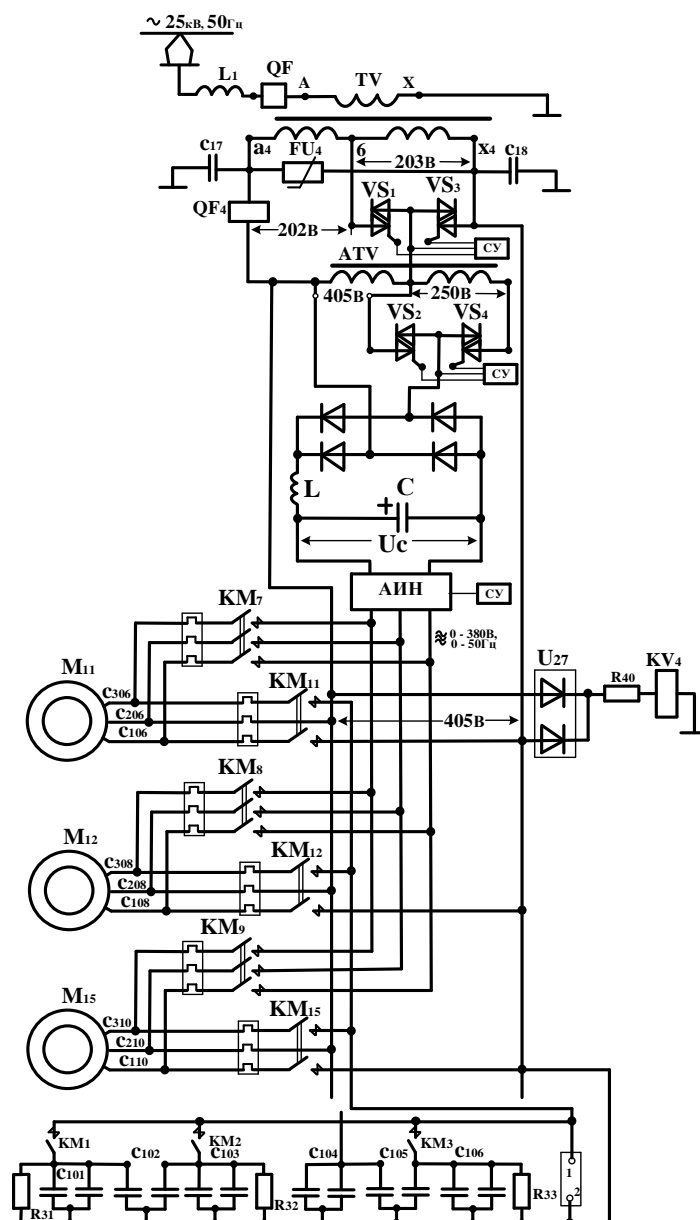


Рис. 2. Принципиальная схема электромеханической системы вспомогательных машин с системой преобразования числа фаз, автотрансформатором и электрическим полупроводниковым вариатором секции электровоза

Fig. 2. Schematic diagram of the electromechanical system of auxiliary machines with the system for converting the number of phases, autotransformer and electric semiconductor variator of the electric locomotive section

В модели учтено активно-индуктивное сопротивление контактной сети 2 и работа тягового электропривода в подсистеме VIP1, которая присоединена к тяговой обмотке 2 трансформатора Trans 1. Осциллограммы напряжения и тока (рис. 4) во вторичной обмотке 3 собственных нужд трансформатора позволяют выполнить спектральное FFT-преобразование с помощью блока powergui и осциллоскопа.

В контуре постоянного тока применяется электролитический конденсатор C_3 эквивалентной емкостью 11 000 мкФ для устранения коротких замыканий обмотки собственных нужд диодами выпрямителя в моменты смены фазы переменного напряжения. Для работы асинхронных двигателей необходим энергообмен реактивной мощностью, который реализуется с помощью емкостного накопителя энергии C_3 .

Нелинейные искажения напряжения в обмотках трансформатора вызваны работой ВИП тягового электропривода электровоза, так как вторичная тяговая обмотка во время коммутации тока в тиристорах плеч ВИП замыкается (рис. 5).

С помощью быстрого преобразования Фурье (FFT) получены результаты спектрального анализа (рис. 6). Выполнены и сведены в табл. 1 расчеты электрических величин в контуре однофазного переменного тока электро-механической системы.

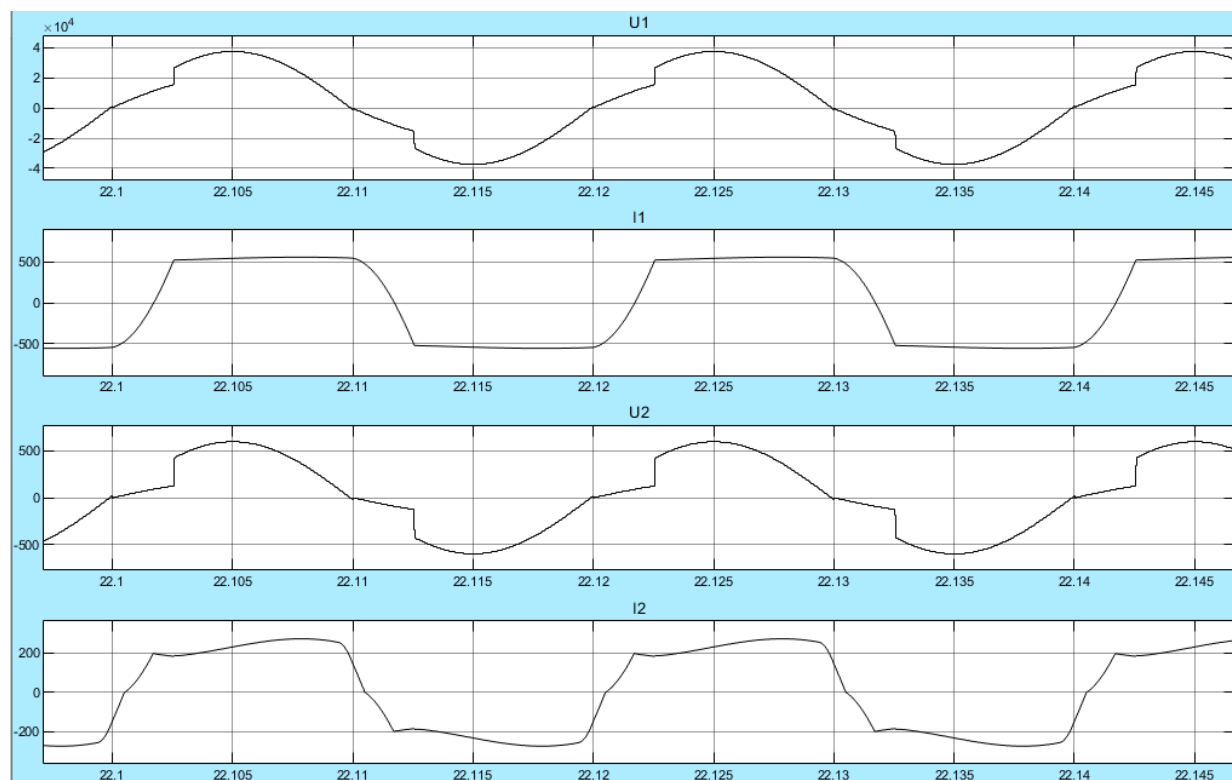


Рис. 4. Осциллограммы напряжения U_1 , тока I_1 в первичной обмотке тягового трансформатора электровоза и напряжения U_2 , тока I_2 в обмотке собственных нужд

Fig. 4. Oscillograms of voltage U_1 of the current I_1 in the primary winding of the traction transformer of an electric locomotive and voltage U_2 of the current I_2 in the auxiliary winding

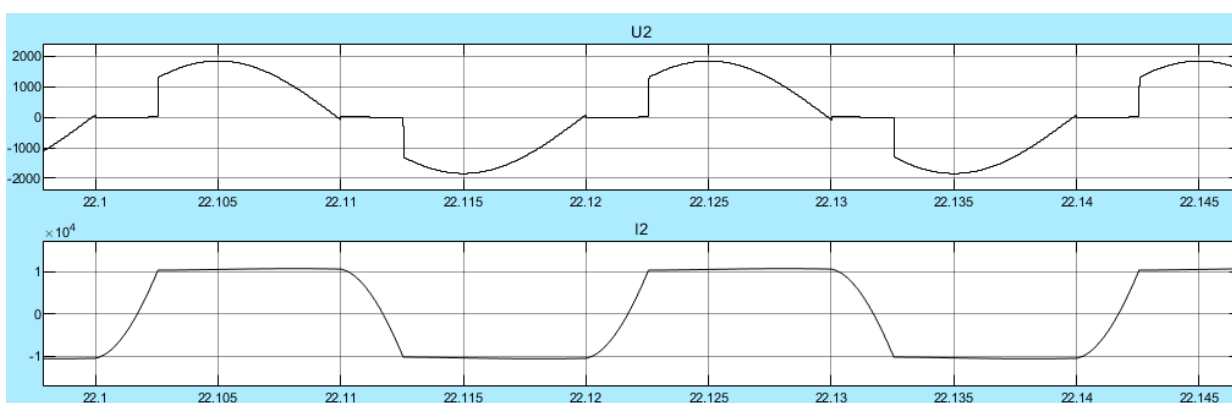


Рис. 5. Осциллограммы напряжения U_2 , суммарного тока I_1 во вторичных тяговых обмотках тяговых трансформаторов трехсекционного электровоза

Fig. 5. Oscillograms of voltage U_2 , total current I_1 in secondary traction windings of traction transformers of a three-section electric locomotive

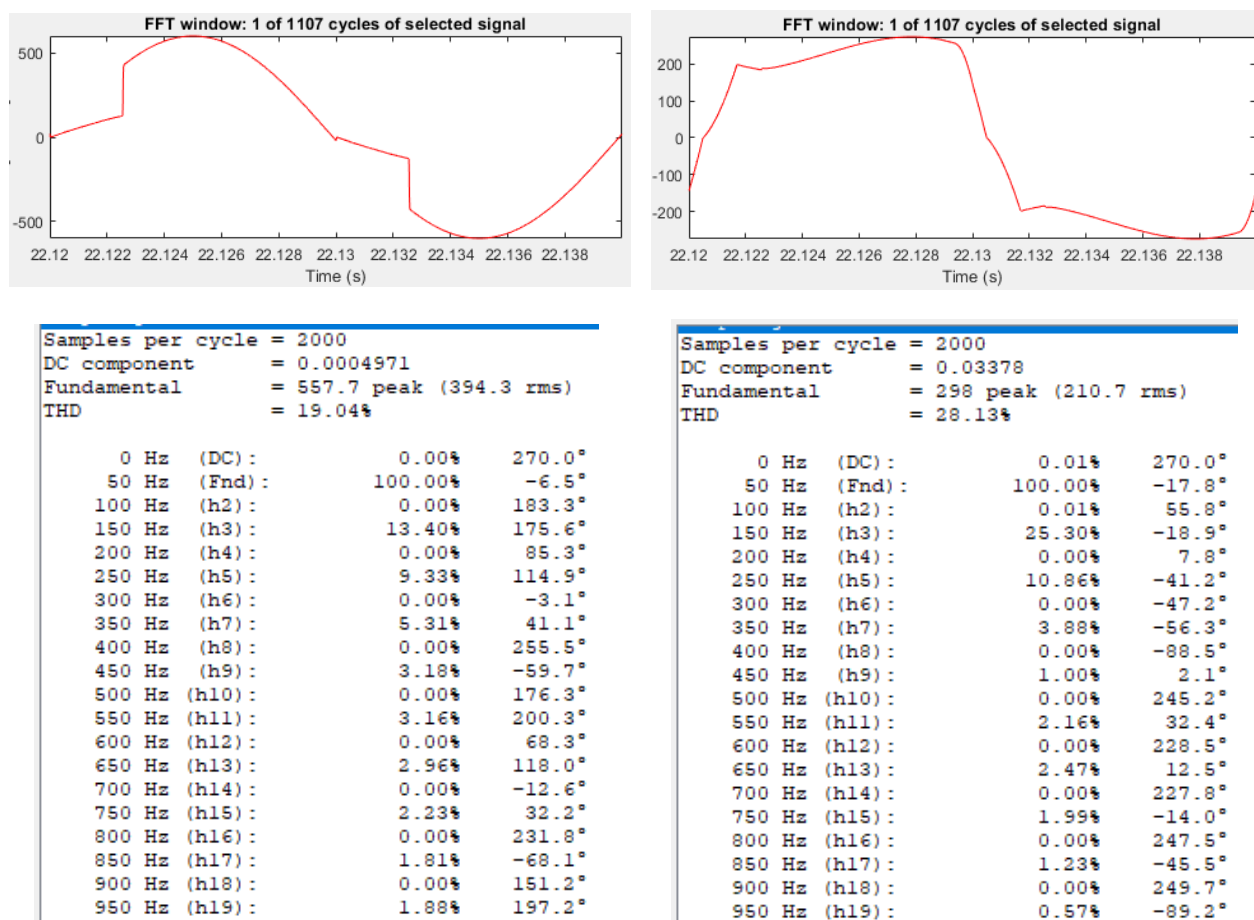


Рис. 6. Результаты спектрального анализа напряжения и тока в обмотке собственных нужд

Fig. 6. Results of spectral analysis of voltage and current in the auxiliary winding

Таблица 1. Результаты расчета электрических величин на входе электромеханической системы

Table 1. Results of calculation of electrical quantities at the input of an electromechanical system

Гармоника Harmonic	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	Σ
U_k , В	394,3	52,84	36,79	20,94	12,54	12,46	11,67	8,79	7,14	7,41	400,86
I_k , А	210,7	53,31	22,81	8,17	2,11	4,55	5,2	4,19	2,59	1,2	218,86
φ_k , эл. град	11,3	194,5	156,1	97,4	-61,8	167,9	105,5	46,2	-22,6	286,4	$\varphi_{\Sigma} = 11,19$
P_k , кВт	81,468	-2,727	-0,77	-0,022	0,012	-0,055	-0,016	0,025	0,017	0,002	77,91
Q_k , кВАр	16,28	-0,705	-0,34	-0,17	-0,023	-0,012	0,058	0,027	-0,007	-0,008	15,41

Суммарный коэффициент гармонических составляющих THD напряжения $K_U = 19,04\%$, тока $K_I = 28,13\%$ в обмотке собственных нужд тягового трансформатора.

В соответствии с разработанной теорией электромагнитных и энергетических процессов [12, 18] полная (кажущаяся) мощность на входе выпрямителя электромеханической системы:

$$S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U \cdot I = 400,86 \cdot 218,86 = 87,732 \text{ кВА},$$

где $U = 400,86$ В, $I = 218,86$ А – действующие значения напряжения и тока на входе электро-механической системы АВМ.

Активная мощность на входе системы рассчитана по формуле:

$$P = U_{C0} \cdot I_0 \cdot \sum_{k=1}^{19} U_{Ck} \cdot I_{Ck} \cdot \cos \varphi_k,$$

где U_{C0} – постоянная составляющая напряжения на входе системы во время проводящего состояния СПП преобразователя; I_0 – постоянная составляющая тока на входе системы; U_{Ck} ,

I_k – действующее напряжение и ток k -ой гармоники; φ_k – угол сдвига по фазе тока k -ой гармоники относительно одноименной k -ой гармоники напряжения. Результаты расчета даны в табл. 1 и суммарная активная мощность равна $P = 77,91$ кВт.

Реактивная мощность на входе системы рассчитана по формуле:

$$Q = \mu \sum_{k=1}^{19} U_{Ck} \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k.$$

Суммарная реактивная мощность учитываемых гармоник на входе системы $Q = 15,41$ кВАр.

Из баланса мощностей на входе электро-механической системы:

$$\sqrt{S^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

можно определить потенциальную мощность ΔS :

$$\Delta S = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \sqrt{87,732^2 - 77,91^2 - 15,41^2} = 37,28 \text{ кВА}.$$

Действующее напряжение на входе выпрямителя системы U_p , которое лучше использовать для снижения потребляемого действующего тока I от обмотки собственных нужд трансформатора:

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{Pk}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U_p \cdot I,$$

$$U_p = \frac{\Delta S}{I} = \frac{37280}{218,86} = 170,34 \text{ В}.$$

С помощью потенциальной мощности ΔS оценивается возможность улучшения электро-магнитной и энергетической эффективности системы АВМ электровоза за счет использования напряжения $U_p = 170,34$ В для выполнения работы и энергообмена в электро-механической системе АВМ электровоза:

$$n_b = 1454 \text{ об/мин}; M_C = 209,8 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$P_{B1} = \frac{M_C \cdot n_B}{9550} = \frac{209,8 \cdot 1454}{9550} = 31,942 \text{ кВт};$$

$$P_B = 2 \cdot 31,942 = 63,884 \text{ кВт};$$

$$\eta = \frac{P_B}{P} \cdot 100\% = \frac{63,884}{77,91} \cdot 100\% = 82\%.$$

Коэффициент мощности системы:

$$K_M = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{77910}{400,86 \cdot 218,86} = 0,89.$$

Из осциллограмм трехфазных токов в обмотках статора электродвигателя i_s (рис. 7) следует, что система преобразования однофазного переменного напряжения U_{CH} в трехфазное переменное двухполярное импульсное напряжение с несущей частотой 5 кГц обеспечивает амплитудную и угловую симметрию трехфазных токов в обмотках статора.

Переменные составляющие кривой мгновенных значений токов с частотой 5 кГц ограни-

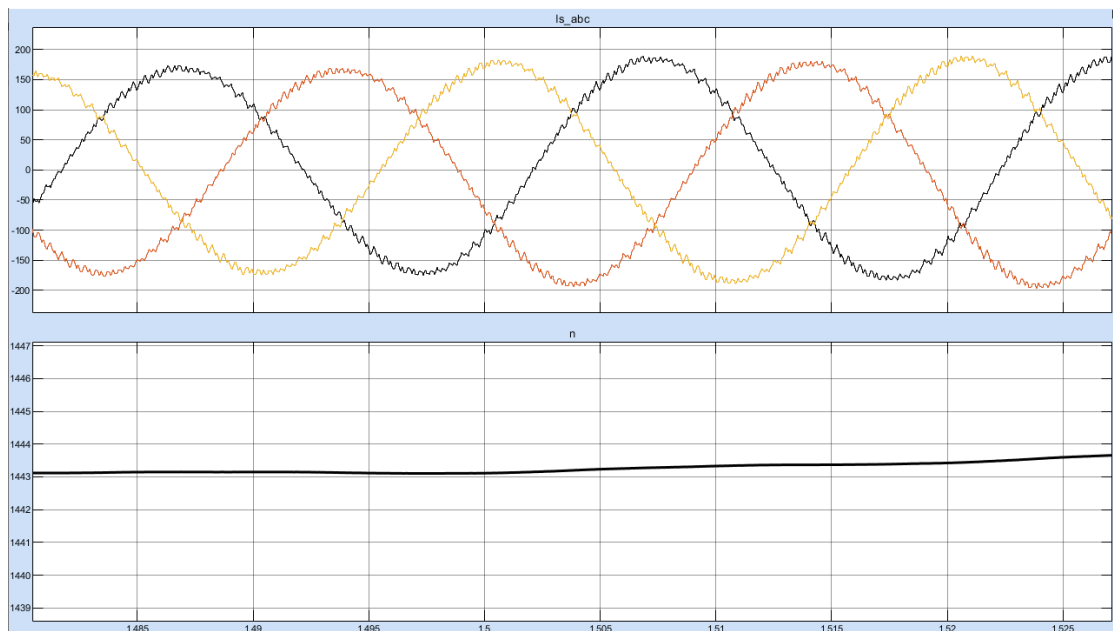


Рис. 7. Осциллограммы трехфазных токов в обмотках статора i_s и частоты вращения вала n асинхронного электродвигателя

Fig. 7. Oscillograms of three-phase currents in the stator windings i_s and the shaft rotation frequency n of an asynchronous electric motor

чиваются индуктивным сопротивлением обмоток статора электродвигателя. Электродвигатель работает на устойчивой ветви механической характеристики в номинальном режиме, в режиме пуска, трогания и разгона за счет частотного управления производительностью мотор-вентилятора электровоза. Получены зависимости КПД η , коэффициента мощности K_M и суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I в обмотке собственных нужд от активной мощности P в обмотке собственных нужд (рис. 8).

Преобразователем выполняется плавное управление производительностью двух мотор-вентиляторов и мотор-насоса. От обмотки собственных нужд потребляется максимальная активная мощность 66 кВт, в обмотках статора электродвигателей частота трехфазного напряжения 50 Гц, действующее линейное напряжение 380 В, $\eta = 87\%$, $K_M = 0,85$, $K_I = 34\%$. С понижением частоты трехфазного напряжения до 25 Гц в обмотках статора от обмотки собственных нужд потребляется активная мощность 13 кВт, практически прямо пропорционально снижается КПД до 81 %, увеличиваются коэффициент мощности до 0,88, $K_I = 45\%$. В дальнейшее снижение частоты трехфазного напряжения до 9 Гц вмешивается интенсивное уменьшение мощности на валу электродвигателей, работа которых приближается к режиму холостого хода, так как производительность вентиляторов и насоса уменьшается в первой

степени, а напор в квадрате от скорости вращения рабочего колеса, поэтому при частоте 5 Гц $\eta \approx 0$, $K_M = 0,9$, $K_I = 48\%$.

Заключение

Разработанная электромеханическая система АВМ электровоза переменного тока обеспечивает устойчивую работу электропривода, расширяет функциональные свойства системы и характеризуется следующими положительными качествами:

1. Снижаются потери активной мощности и повышаются энергетические показатели системы, КПД не ниже 81 %, коэффициент мощности – 0,85 на большей части диапазона регулирования мощности машин за счет изменения электрического сопротивления в контурах системы и более полного использования напряжения обмотки собственных нужд.

2. Повышается электромагнитная совместимость преобразователя с системой электропитания, суммарный коэффициент гармонических составляющих тока не более 48 % за счет применения емкостного и индуктивных накопителей энергии. При работе преобразователя электрического сопротивления к обмоткам статора электродвигателя прикладывается симметричное трехфазное напряжение, а по обмоткам статора протекает ток, близкий к синусоидальной форме.

3. Повышаются функциональные возможности и надежность системы посредством

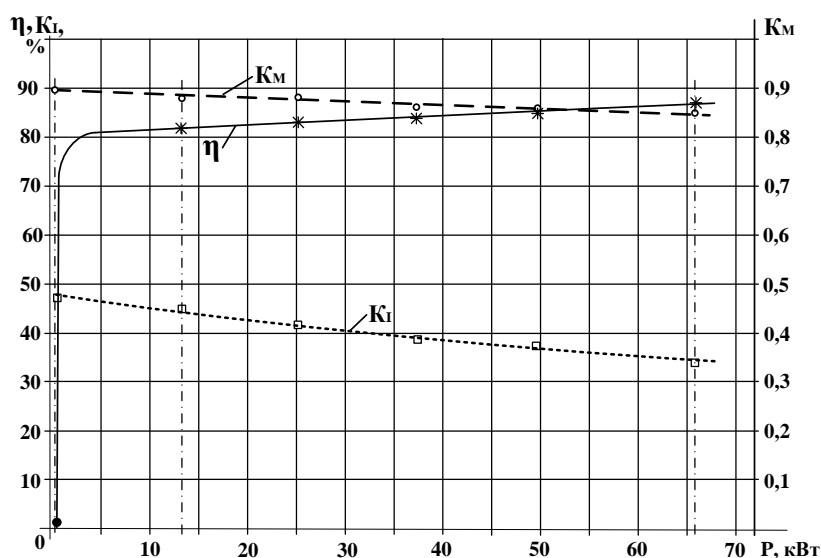


Рис. 8. Зависимость коэффициента мощности K_M , КПД η , коэффициента гармонических составляющих тока K_I от активной мощности P на входе электромеханической системы

Fig. 8. Dependence of the power factor K_M , efficiency η , harmonic current coefficient K_I on the active power P at the input of the electromechanical system

применения плавного и ступенчатого управления производительностью машин за счет работы электродвигателей на устойчивой ветви механической характеристики, прохождения нейтральной вставки в контактной сети без отключения, повторного включения машин и самостоятельной транспортировки подвижного состава с линии при отказе вспомогательного оборудования электровоза.

4. Снижается установленная мощность преобразователя электрического сопротивления и повышается надежность системы при сочетании плавного управления производительностью машин со ступенчатым переходом на систему с симметрирующими конденсаторами в случае отказа одной из систем за счет возможности «горячего» резервирования.

Список литературы

1. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. М. : М-во образования и науки РФ, 2014. 244 с.
2. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
3. Крапивин М.И., Куцый А.П., Пузина Е.Ю. Разработка технических решений по увеличению пропускной способности системы тягового электроснабжения участка Восточного полигона // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России : сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. Сургут, 2024. С. 180–186.
4. Бардушко А.Ю., Куцый А.П. Повышение пропускной способности электрифицированного участка железной дороги Якурим – Киренга на перспективу // Молодая наука Сибири. 2023. № 4 (22). С. 182–193. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/1548/1038> (Дата обращения: 12.04.2025).
5. Рекордный транзит. В ОАО «РЖД» фиксируют рост объемов перевозок по Новому шелковому пути // Гудок : сайт. URL : <https://gudok.ru/content/freighttrans/1558260/> (дата обращения 10.04.2025).
6. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К) : руководство по эксплуатации. Т. 1. Кн. 1. Описание и работа. Электрические схемы. ИДМБ.661142.009.РЭ1. Новочеркасск : ВЭЛНИИ, 2005. 266 с.
7. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К) : Руководство по эксплуатации. Т. 2. Кн. 5. Описание и работа. Электрическое оборудование. Преобразователи. ИДМБ.661142.009.РЭ5. Новочеркасск. ВЭЛНИИ, 2005. 142 с.
8. Паршин А.Н. Регулируемый электропривод на базе тиристорного преобразователя с непосредственной связью для систем собственных нужд электровозов переменного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 24 с.
9. Титова Т.С., Евстафьев А.М. Энергоэффективные системы вспомогательного электропривода электрического подвижного состава // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2017. № 5 (72). С. 60–63.
10. Алексеева Т.Л. Анализ закономерностей регулирования мощности в электроэнергетической системе. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. 208 с.
11. Рябченко Н.Л. Повышение энергетической эффективности регуляторов мощности электроподвижного состава. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. 196 с.
12. Рябченко Н.Л., Астраханцев Л.А., Тихомиров В.А. Энергосбережение в электроэнергетических системах и математическое обоснование совершенствования подготовки инженеров-электриков // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Чита, 2024. Т. 1. С. 338–350.
13. Пустоветов М.Ю. Пульсации электромагнитного момента асинхронной электрической машины, работающей в составе вспомогательного электропривода электровоза переменного тока – фактор, способствующий отказам подшипников // Механика XXI века. 2016. №15. С. 331–337.
14. Wheel slip control based on traction force estimation of electric locomotives / T. Ishrat, G. Ledwich, M. Vilathgamuwa et al. // Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). Brisbane, 2016. DOI : 10.1109/AUPEC.2016.7749331.
15. Литовченко В.В., Невинский А.В., Сидорова Н.Н. Расщепитель фаз для вспомогательных машин электровозов переменного тока // Электротехника. 2012. № 12. С. 37–42.
16. Пат. 2309521 Рос. Федерация. Преобразователь частоты и числа фаз / А.В. Беляев, Л.В. Никонов, А.М. Рутштейн. № 2006106332/09 ; заявл. 28.02.2006 ; опубл. 27.10.2007, Бюл. № 30. 5 с.
17. Невинский А.В. Совершенствование системы питания вспомогательных электроприводов электровозов переменного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 23 с.
18. Энергетическая эффективность в электрических цепях с полупроводниковыми приборами / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев и др. // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20. № 2. С. 89–98.
19. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. Т. 2. 307 с.
20. Карзов Б.Н., Кастров М.Ю. Схемы коррекции коэффициента мощности с учетом фильтрации помех сетевого напряжения // Практическая силовая электроника. 2009. № 2 (34). С. 2–7.
21. Краснов И.Ю., Черемисин В.Н. Проектирование активного корректора коэффициента мощности и имитационное моделирование его работы // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2009. Т. 314. № 4. С. 92–97.
22. Рощупкин Г.В., Шевцов Д.А., Благинин Д.В. Повышение энергоэффективности однофазного корректора коэффициента мощности // Практическая силовая электроника. 2021. № 2 (82). С. 8–11.
23. Каталог тяговых электродвигателей ОАО НПО «Новочеркасский электровазостроительный завод» // Региональный Центр Инновационных Технологий : сайт. URL: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html> (Дата обращения: 10.03.2025).

References

1. Prognoz nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda [Forecast of scientific and technological development of the Russian Federation for the period up to 2030]. Moscow: Ministerstvo obrazovaniya i nauki RF Publ., 2014. 244 p.
2. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»].
3. Krapivin M.I., Kutsyi A.P., Puzina E.Yu. Razrabotka tekhnicheskikh reshenii po uvelicheniyu propusknoi sposobnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Vostochnogo poligona [Development of technical solutions to increase the capacity of the traction power supply system of the Eastern polygon site]. *Sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy elektroenergetiki i telekommunikatsii Severa Rossii»* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference «Problems of electric power industry and telecommunications of the North of Russia»]. Surgut, 2024, pp. 180–186.
4. Bardushko A.Yu., Kutsyi A.P. Povyshenie propusknoi sposobnosti elektrifitsirovannogo uchastka zheleznoi dorogi Yakurim – Kirenga na perspektivu [Increasing the capacity of the electrified section of the Yakurim – Kirenga railway for the future]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 4 (22), pp. 182–193.
5. Rekordnyy tranzit. V OAO «RZhD» fiksiruyut rost ob'emov perevozok po Novomu shelkovomu puti (elektronnyy resurs) [Record transit. Russian Railways records an increase in traffic volumes along the New Silk Road (electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1558260/> (Accessed April 10, 2025).
6. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K): Rukovodstvo po ekspluatatsii. T. 1. Kniga 1. Opisanie i rabota. Elektricheskie skhemy. IDMB.661142.009.RE1 [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K): Operation manual. Vol. 1. Book 1. Description and operation. Electrical circuits. IDMB.661142.009.RE1]. Novocherkassk: VEINII Publ., 2005. 266 p.
7. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K): Rukovodstvo po ekspluatatsii. T. 2. Kniga 5. Opisanie i rabota. Elektronnoe oborudovanie. Preobrazovateli. IDMB.661142.009.RE5 [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K): Operation manual. Vol. 2. Book 5. Description and work. Electronic equipment. Converters. IDMB.661142.009.RE5]. Novocherkassk: VEINII Publ., 2005. 142 p.
8. Parshin A.N. Reguliruemiy elektropriwod na baze tiristornogo preobrazovatelya s neposredstvennoy svyaz'yu dlya sistem sobstvennykh nuzhd elektrovozov peremennogo toka [An adjustable electric drive based on a thyristor converter with direct connection for systems of own needs of alternating current electric locomotives]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2006. 24 p.
9. Titova T.S., Evstaf'ev A.M. Energoeffektivnye sistemy vspomogatel'nogo elektropriroda elektricheskogo podvizhnogo sostava [Energy-efficient auxiliary electric drive systems for electric rolling stock]. *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. A journal about science, practice, and economics], 2017, no 5 (72), pp. 60–63.
10. Alekseeva T.L. Analiz zakonomernostei regulirovaniya moshchnosti v elektroenergeticheskoi sisteme [Analysis of regularities of power regulation in the electric power system]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. 208 p.
11. Ryabchenok N.L. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti regulyatorov moshchnosti elektropodvizhnogo sostava [Improving the energy efficiency of electric rolling stock power regulators]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. 196 p.
12. Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energoberezhenie v elektroenergeticheskikh sistemakh i matematicheskoe obosnovanie sovershenstvovaniya podgotovki inzhenerov-elektrikov [Energy conservation in electric power systems and mathematical justification for improving the training of electrical engineers]. *Materialy Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the All-Russian (with international participation) scientific and practical conference «Education - Science – Production»]. Chita, 2024, Vol. 1, pp. 338–350.
13. Pustovetov M.Yu. Pul'satsii elektromagnitnogo momenta asinkhronnoi elektricheskoi mashiny, rabotayushchei v sostave vspomogatel'nogo elektropriroda elektrovoza peremennogo toka – faktor, sposobstvuyushchii otkazam podshipnikov [Pulsations of the electromagnetic moment of an asynchronous electric machine operating as part of an auxiliary electric drive of an alternating current electric locomotive are a factor contributing to bearing failures]. *Mekhaniki XXI veku* [Mechanics for the XXI century], 2016, no 15, pp. 331–337.
14. Ishrat T., Ledwich G., Vilathgamuwa M., Borghesani P. Wheel slip control based on traction force estimation of electric locomotives // Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). Brisbane 2016. DOI: 10.1109/AUPEC.2016.7749331.
15. Litovchenko V.V., Nevinskii A.V., Sidorova N.N. Rasshchepitel' faz dlya vspomogatel'nykh mashin elektrovozov peremennogo toka [Phase splitter for auxiliary machines of alternating current electric locomotives]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2012, no 12, pp. 37–42.
16. Belyaev A.V., Nikonov L.V., Rutshtein A.M. Patent RU 2309521 C1, 27.10.2007.
17. Nevinskii A.V. Sovershenstvovanie sistemy pitaniya vspomogatel'nykh elektropriwodov elektrovozov peremennogo toka [Improvement of the power supply system for auxiliary electric drives of alternating current electric locomotives]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2011, 23 p.
18. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' v elektricheskikh tsepyakh s poluprovodnikovymi priborami [Energy Efficiency of Electrical Circuits Carrying Semiconductor Devices]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Energetika»* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering] 2020, vol. 20, no 2, pp. 89–98.
19. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and Converter Technology]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2015, Vol. 2, 307 p.

20. Karzov B.N., Kastrov M.Yu. Skhemy korrektsii koefitsienta moshchnosti s uchetom fil'tratsii pomekh setevogo napryazheniya [Power factor correction schemes with consideration of mains voltage interference filtering]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical power electronics], 2009, no 2 (34), pp. 2–7.

21. Krasnov I.Yu., Cheremisin V.N. Proektirovanie aktivnogo korrektora koefitsienta moshchnosti i imitatsionnoe modelirovanie ego raboty [Design of an active power factor corrector and simulation of its operation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletins of Tomsk Polytechnic University], 2009, Vol. 314, no 4, pp. 92–97.

22. Roshchupkin G.V., Shevtsov D.A., Blagin D.V. Povyshenie energoeffektivnosti odnofaznogo korrektora koefitsienta moshchnosti [Improving the energy efficiency of a single-phase power factor corrector]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical Power Electronics], 2021, no 2 (82), pp. 8–11.

23. Katalog tyagovykh elektrodvigatelei OAO NPO «Novocherkasskii elektrovostroitel'nyi zavod» (Elektronnyi resurs) [Traction motors catalogue of NovoCherkassk Electric Locomotive Plant (Electronic resource)]. Available at: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html> (Accessed March 10, 2025).

Информация об авторах

Рябченко Наталья Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astranal@mail.ru.

Астраханцев Леонид Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: astrahancev1943@mail.ru.

Тихомиров Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: svat_irk@mail.ru.

Немыкина Валентина Валерьевна, аспирант кафедры электрической тяги, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: nemykinavv@mail.ru.

Information about the authors

Natal'ya L. Ryabchenok, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: astranal@mail.ru.

Leonid A. Astrakhantsev, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: astrahancev1943@mail.ru.

Vladimir A. Tikhomirov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: svat_irk@mail.ru.

Valentina V. Nemykina, Ph.D. Student of the Department of Electric Traction, Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: nemykinavv@mail.ru.

Реконструкция шпалопропиточного завода на Красноярской железной дороге: технические аспекты

Д.А. Пятков✉, В.А. Курочкин, А.Н. Жестовский

Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск, Российская Федерация

✉d.pyatkov@list.ru

Резюме

В контексте современной индустриальной эпохи требуется комплексно анализировать стратегии модернизации и развития промышленных предприятий, интегрируя принципы экономической целесообразности и экологической устойчивости в единую систему стратегического планирования. Также в целях реализации инфраструктурного проекта по прокладке второго пути на Байкало-Амурской магистрали необходима организация производственного комплекса, который будет способствовать частичной компенсации возникающего дефицита подрельсовых оснований. Создание такого предприятия позволит оптимизировать существующую производственную инфраструктуру и обеспечить рациональное распределение соответствующих мощностей между действующими компаниями, специализирующимися на выпуске железнодорожной продукции для региональных транспортных систем. Шпалопропиточный завод, расположенный на Красноярской железной дороге, является одним из ключевых производителей деревянных шпал и брусев, обеспечивающим строительство и ремонт железнодорожных путей. В условиях интенсификации железнодорожных перевозок и увеличения осевых нагрузок на пути становится актуальным вопрос модернизации подрельсовых оснований. Экспериментально доказано, что железобетонные шпалы демонстрируют превосходящие эксплуатационные характеристики по сравнению с традиционными деревянными конструкциями, повышая устойчивость к механическим нагрузкам и продлевая жизненный цикл железнодорожного пути. Модернизация производства шпалопропиточного завода с внедрением технологии изготовления железобетонных шпал является наилучшим решением для удовлетворения потребностей инфраструктурного комплекса Красноярской, Восточно-Сибирской и Западно-Сибирской железных дорог. Такая переориентация способствует оптимизации логистических процессов за счет локализации производства и минимизации транспортных затрат при поставках путевой инфраструктуры. В работе представлены технические и технологические аспекты перепрофилирования завода: оборудование, схема его расположения и технология изготовления железобетонных шпал.

Ключевые слова

шпалопропиточный завод, подрельсовое основание, инфраструктурный проект, железнодорожная продукция, Красноярская железная дорога, железобетонные шпалы, перепрофилирование, железнодорожный путь, расширение ассортимента

Для цитирования

Пятков Д.А. Реконструкция шпалопропиточного завода на Красноярской железной дороге: технические аспекты / Д.А. Пятков, В.А. Курочкин, А.Н. Жестовский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 74–83. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).74-83.

Информация о статье

поступила в редакцию: 24.04.2025 г.; поступила после рецензирования: 05.05.2025 г.; принята к публикации: 06.05.2025 г.

Reconstruction of the sleeper plant on the Krasnoyarsk railway: technical aspects

D.A. Pyatkov✉, V.A. Kurochkin, A.N. Zhestovskii

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – branch of the Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉d.pyatkov@list.ru

Abstract

In the context of the modern industrial era, it is necessary to comprehensively analyze the modernization and development strategies of industrial enterprises, integrating the principles of economic feasibility and environmental sustainability into a single strategic planning system. Also, in order to implement an infrastructure project of laying a second track on the Baikal-Amur mainline, it is necessary to organize a production complex that will partially compensate for the shortage of under-rails. The establishment of this enterprise will optimize the existing production infrastructure and ensure a rational distribution of production capacities among existing enterprises specializing in the production of railway products for regional transport systems. The sleeper plant, located on the Krasnoyarsk Railway, is one of the key enterprises for the production of wooden sleepers and beams ensuring the construction and repair of railway tracks. In the context of the intensification of railway transportation and an increase in axial loads on the railway track, the issue of upgrading the sub-rail bases is becoming urgent. It has been experimentally

proven that reinforced concrete sleepers demonstrate superior performance characteristics as compared to traditional wooden structures, providing increased resistance to mechanical stress and an extended life cycle. The modernization of the production profile of this sleeper making plant with the introduction of reinforced concrete sleeper manufacturing technology is the optimal solution to meet the needs of the infrastructure complex of the Krasnoyarsk, East Siberian and West Siberian Railways. This repurposing helps optimize logistics processes by localizing production and minimizing transportation costs for the supply of track infrastructure. The technical and technological aspects of the conversion of the plant are presented: equipment, equipment layout and production technology of reinforced concrete sleepers.

Keywords

sleeper plant, sub-rail base, infrastructure project, railway products, Krasnoyarsk railway, reinforced concrete sleepers, repurposing, railway track, product range expansion

For citation

Pyatkov D.A., Kurochkin V.A., Zhestovskii A.N. Rekonstruktsiya shpalopropitochного завода на Красноярской железной дороге: технические аспекты [Reconstruction of the sleeper plant on the Krasnoyarsk railway: technical aspects]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 74–83. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).74-83.

Article Info

Received: April 24, 2025; Revised: May 5, 2025; Accepted: May 6, 2025.

Введение

Конструкция железнодорожного пути представляет собой сложную инженерную систему, состоящую из двух частей: верхнее строение пути (рельсы, крепления, шпалы, балласт) и нижнее строение пути (земляное полотно, искусственные сооружения). Ее надежность и долговечность напрямую влияют на безопасность движения поездов, пропускную способность линий и экономические показатели эксплуатации.

Основной тип конструкции железнодорожного пути на Восточном полигоне – бесстыковой, для укладки которого требуются железобетонные шпалы. Доставка этих видов шпал для капитального ремонта железнодорожного полотна и строительства новых веток пути осуществляется из Иркутска и Красноярска, что затрудняет логистику и повышает расходы на проведение таких работ в удаленных районах полигона.

Строительство второго пути Байкало-Амурской магистрали (БАМ) – масштабная работа в рамках развития Восточного полигона железных дорог России, и дальнейшее управление его техническим состоянием при эксплуатации требует развития инфраструктуры, обеспечивающей этот процесс всеми необходимыми материалами, в том числе и таким элементом верхнего строения пути, как железобетонная шпала. В условиях низкой плотности населения в регионе, расположенном вдоль линии БАМ, производство железобетонных шпал на базе шпалопропиточного завода является

экономически целесообразным [1]. Для этого необходимо произвести реконструкцию завода с целью его перепрофилирования с пропитки деревянных шпал на производство железобетонных шпал и бруса. Использование производственных мощностей бывшего шпалопропиточного завода позволит снизить эксплуатационные расходы на управление техническим состоянием железнодорожного пути, улучшить экологические показатели производства самого завода, поскольку изготовление железобетонных изделий создает меньшую нагрузку на окружающую среду, чем пропитка деревянных шпал, так как пропитка осуществляется креозотом, который оказывает негативное влияние на окружающую среду.

Таким образом, объектом исследования является шпалопропиточный завод на Красноярской железной дороге [1], который способен обеспечить требования современных тенденций в области производства железобетонных шпал посредством осуществления его перепрофилирования с пропитки деревянных шпал на производство железобетонных шпал и бруса.

Рассмотрим технические аспекты разработки и внедрения технологии производства железобетонных шпал на шпалопропиточном заводе. Нововведение заключается в комбинированном производстве железобетонных и деревянных шпал подобно Калининскому шпалопропиточному заводу. Поскольку железобетонные шпалы пользуются большим спросом, а деревянные востребованы меньше, гибридное производство позволит предприятию занять

лидирующие позиции и получить экономическую выгоду, а также удовлетворить потребности железнодорожного сектора.

Цель данной статьи – описание технических решений, внедренных в процессе реконструкции завода для обеспечения требований в области производства железобетонных шпал, и снижение расходов при производстве работ по укладке бесстыкового пути – второго пути БАМ. Основные решаемые задачи: предоставить техническо-производственное описание завода [1] и используемую на нем технологию по изготовлению деревянных шпал и брусьев; разработать

схему организации перепрофилирования с учетом размещения необходимого оборудования в соответствии с технологией производства железобетонных и деревянных шпал.

Описание завода и используемой технологии производства

Рассматриваемый завод входит в состав АО «ТрансВудСервис», которое является дочерней организацией ОАО «РЖД». Завод расположен в пос. Нижняя Пойма (ж/д ст. Решоты) [1]. План расположения объектов, входящих в состав завода, представлен на рис 1.



Рис. 1. План шпалопродовольного завода

Fig. 1. The plan of the sleeper plant

Ранее на указанном предприятии производилась пропитка древесины всех пород: в закрытых цилиндрах с применением давления и вакуума. Его производительность в 2023 г. составила порядка 250 тыс. м³. Площадь завода – более 60 га [2]. Технология переработки древесины включает основные и вспомогательные процессы. К основным относятся приемка, складирование, сушка [3, 4], глубокая наколка, установка крепежителей [5], пропитка, контроль качества, хранение и погрузка; к вспомогательным – нагрев и циркуляция антисептика, изменение давления в системе, отвод и очистка жидкостей и газов.

В состав объектов предприятия входит: склад сырой продукции; цех пропитки с машинным отделением и котельной; очистные сооружения; станция газоочистки; склад антисептирующих материалов; склад готовой продукции; транспортное хозяйство; подъездные пути железнодорожного транспорта (15 км) [2].

Описание реконструкции завода

Цель предлагаемой реконструкции заключается в изменении профиля производственного процесса для повышения разнообразия выпускаемой продукции и усиления конкурентных позиций на рынке материалов для строительства и управления техническим состоянием при использовании верхнего строения пути.

Реконструкция предполагает частичную модернизацию существующего предприятия [6, 7] с установкой нового оборудования для производства железобетонных шпал, что позволит повысить производительность завода, улучшить качество продукции, расширит ее ассортимент и снизит издержки производства. Также решается вопрос транспортировки железобетонных шпал конечным потребителям, поскольку расстояние от заводов-изготовителей (Хабаровский завод – 4 430 км, Горновский завод – 831 км, рассматриваемое предприятие – 355 км) до Красноярска по железной дороге составляет менее 50 % от общей протяженности маршрута, что сокращает объем перевозимых грузов и влияет на время доставки продукции от поставщика к потребителю. Данное обстоятельство будет иметь экономический эффект не только для Красноярской железной дороги, но и для соседних – Восточно-Сибирской и Западно-Сибирской железных дорог [8].

Также с ростом осевых нагрузок на железнодорожный путь, которые, в соответствии со стратегией развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 г., составят 30 т, производство железобетонных шпал с увеличенным сечением является актуальным вопросом [9].

Оборудование

Для производства на базе завода железобетонной продукции в виде шпал требуется специальное оборудование:

- линии производства железобетонных шпал;
- конвейеры для транспортировки инертных грузов, цемента [10];
- ангар каркасный двускатный, площадью 6 000 м²;
- подъездной путь для осуществления транспортировки;
- бетономеситель СМР 500/330 (рис. 2).



Рис. 2. Бетономеситель СМР 500/330

Fig. 2. Concrete mixer СМР 500/330

Описание производства (описание внедрений)

Схема расположения оборудования на территории предлагаемого ангара представлена на рис. 3.

Четыре конвейерных линии по производству железобетонных шпал 7 протяженностью 40 м и шириной 18 м расположены параллельно друг другу, в торцах ангара находится бетономеситель СМР 500/330 3, длина и ширина которого 1,87 м, в левом углу место забора цемента 1, за пределами ангара с правой стороны место забора инертных материалов 5, длина и ширина которого 10 м, конвейеры для подачи инертных грузов и цемента 2, кран 8 расположен в ангаре по ширине, подъезд для транспортировки цемента и железобетонных шпал 9.

Инертные грузы будут храниться вне цеха, так как они не подвержены воздействию

атмосферных условий. Такое расположение ресурсов на открытой площадке позволит, во-первых, более эффективно использовать внутреннее пространство здания, во-вторых, удобно их транспортировать, что обеспечит контроль доступа к ним. При этом достигается определенный экономический эффект за счет рационального использования пространства. Погрузку инертных материалов в бетоносмеситель планируется осуществлять при помощи конвейера.

Основная часть цемента будет храниться на складе сырой продукции деревянных шпал, из которого в последующем он будет перевозиться с помощью автотранспорта в место забора в ангаре. Выгрузка цемента из мешков осуществляется вручную, а погрузка в бетоносмеситель – с помощью конвейера.

Расположение конвейеров у бетоносмесителя представлено на рис. 4 и 5. Затем бетон будет перемещаться по круговым конвейерам на линии производства железобетонных шпал.

Пропарочная камера, участвующая в технологическом процессе изготовления железобетонных шпал, находится под линиями производства, а погрузка готовой продукции будет осуществляться с помощью крана.

Технология производства железобетонных шпал

В результате перепрофилирования завода предусматривается использование современных технологий в производстве железобетонных шпал и брусев:

- применение автоматизированных систем формования и заливки бетона;
- разработка специальных смесей бетона с учетом требований прочности и долговечности железобетонных конструкций;
- внедрение современных методов испытаний для контроля качества продукции.

На новой линии будет использоваться технология производства железобетонных шпал с применением предварительно напряженной ар-

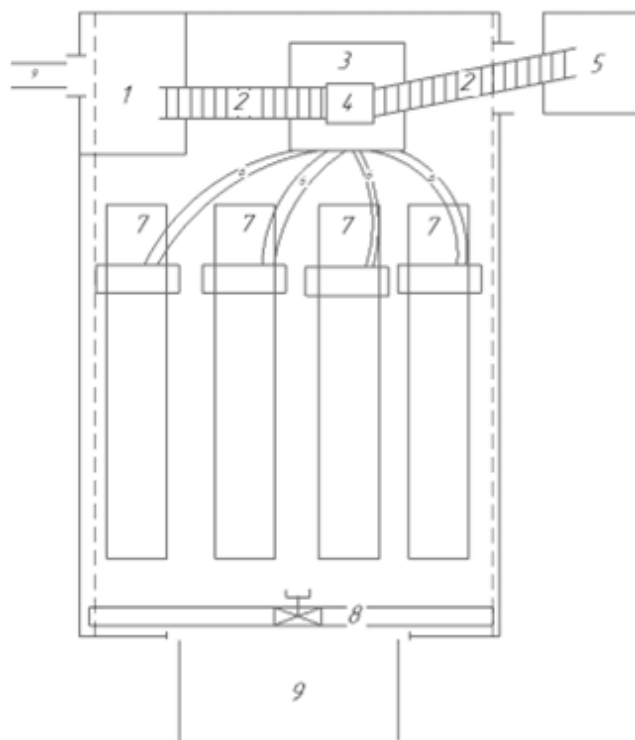


Рис. 3. Схема расположения оборудования в ангаре:

- 1 – место забора цемента; 2 – конвейер; 3 – бетоносмеситель; 4 – люк бетоносмесителя;
5 – место забора крупного заполнителя; 6 – конвейер круговой; 7 – линия производства железобетонных шпал; 8 – подвижной кран; 9 – подъезд

Fig. 3. Equipment layout in the hangar:

- 1 – cement intake point; 2 – conveyor; 3 – concrete mixer; 4 – concrete mixer hatch;
5 – coarse aggregate intake point;
6 – circular conveyor; 7 – railway sleeper production line;
8 – movable crane; 9 – entrance

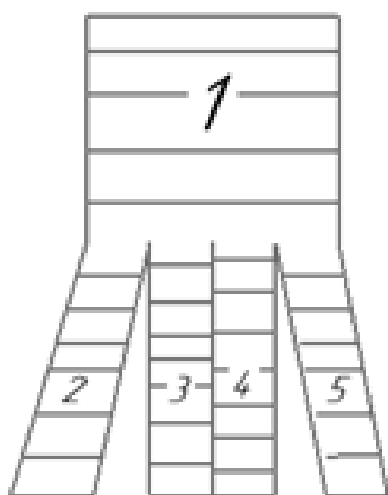


Рис. 4. Расположение конвейеров, подходящих к бетономесителю (вид сверху):
1 – конвейер (общий); 2 – конвейер (линия № 1);
3 – конвейер (линия № 2); 4 – конвейер (линия № 3);
5 – конвейер (линия № 4)

Fig. 4. The location of the conveyors feeding to the concrete mixer (top view):

1 – conveyor (general); 2 – conveyor (line No 1);
3 – conveyor (line No 2); 4 – conveyor (line No 3);
5 – conveyor (line No 4)

матуры. Это позволит получить изделия с высокими прочностными характеристиками, а использование экологически чистых материалов для изготовления железобетонных изделий обеспечит соответствие требованиям современного железнодорожного строительства.

Технологическая схема производства железобетонных шпал [11] представлена на рис. 6.

Опишем процесс изготовления железобетонных шпал с использованием предварительно напряженной арматуры.

Намотанную на катушку арматурную проволоку подают в пролеты производства шпал электрокарами для изготовления струнопакетов. С помощью мостового крана катушки устанавливают на осях бухтодержателя, от которого концы проволок заводят через блоки тормозных роликов в распределительные устройства стола для сборки пакетов-клиньев. Гидравлическим прессом концы проволок зажимают между волнистыми клиньями и закрепляют с помощью винтов, которые ввинчивают в обойму гайковертами. Конвейер с помощью захватов вытягивает пучок проволоки на длину пяти шпал. Затем на специальном столике устанавливают два пакета клиньев.

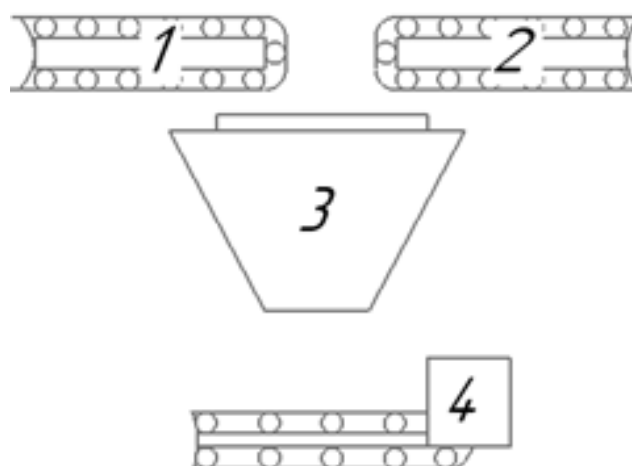


Рис. 5. Расположение конвейеров, подходящих к бетономесителю (вид сбоку):

1 – конвейер (цемент); 2 – конвейер (инертные материалы); 3 – бетономеситель;
4 – конвейер (бетон)

Fig. 5. The location of the conveyors feeding to the concrete mixer (side view):

1 – conveyor (cement); 2 – conveyor (inert materials);
3 – concrete mixer; 4 – conveyor (concrete)

Они обжимаются прессом и закрепляются болтами с помощью гайковертов. Вытянутый струнопакет после захвата его траверсой отрезают дисковой пилой и в натянутом состоянии кран-балкой укладывают в форму. Аналогично изготавливают второй пакет.

Форму с двумя уложенными пакетами передают рольгангом на стенд для установки закладных частей. Последние служат для образования отверстий и площадок, обеспечивающих крепление рельса к шпалам, и состоят из пустообразователей, болтов, гаек и пластин. Для отделения шпал друг от друга в форме устанавливают разделительные диафрагмы. Закладные части к посту их укладки подают на ручных тележках. Установку закладных частей производят вручную. Далее осуществляют натяжение струнопакетов, оборудованных гидродомкратами [12] и предохранительным устройством.

Бетон из бетономесителя по конвейеру подают в бетоноукладчик, который осуществляет укладку бетонной смеси. Уплотняют на виброплощадке. Затем форму приводным рольгангом передают на вторую виброплощадку, оборудованную пригрузочным щитом, которая поднимается и опускается с помощью электро-

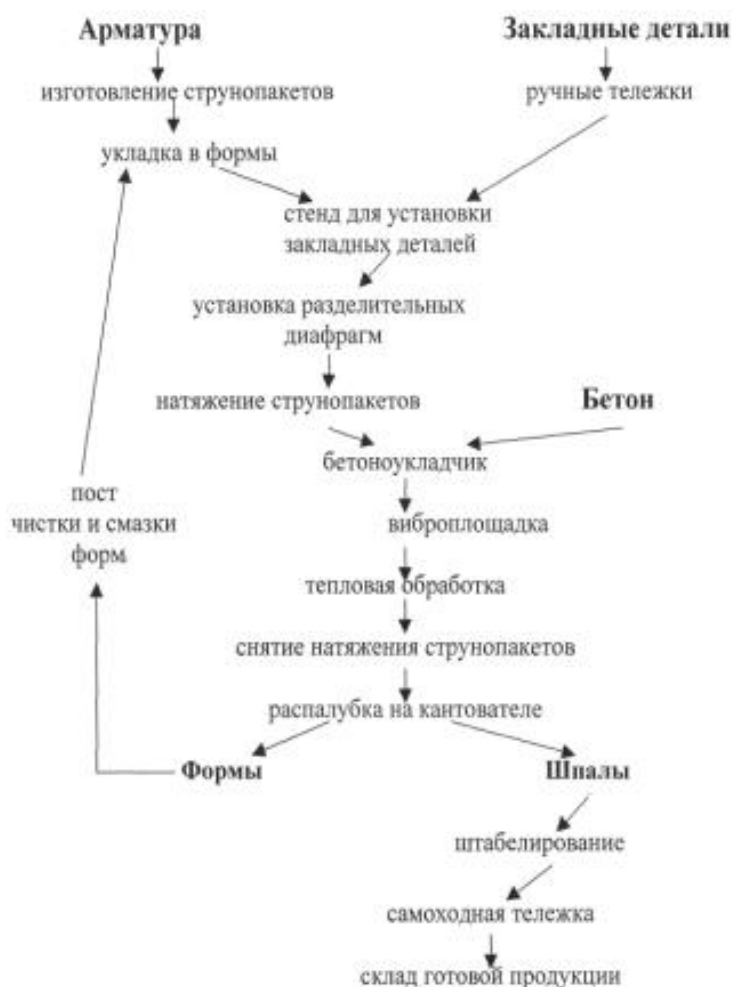


Рис. 6. Технологическая схема производства железобетонных шпал
Fig. 6. Technological scheme for production of reinforced concrete sleepers

тельфера. Окончательное уплотнение производится в два приема без пригруза и с пригрузом, который одновременно осуществляет формовку подошвы шпал.

Тепловую обработку производят по следующему режиму: выдержка – 2 ч; подъем температуры до 80 °С – 3 ч; изотермический прогрев при 80 °С – 2 ч; снижение температуры – 4 ч. Всего – 11 ч.

Затем гидродомкратами снимают натяжение арматуры, а снятые обоймы и клинья укладывают в контейнер и мостовым краном передают к столу сборки пакетов. Форму с двумя плетями шпал по пять штук мостовым краном подают на кантователь и переворачивают. Шпалы поступают на пластинчатый конвейер, а форма возвращается к кантователям на рольганг. С помощью приводных роликов форма подается на стенд для очистки и смазки, по-

сле чего рольгангом перемещается на пост укладки струнопакетов и цикл повторяется.

Петли шпал на пластинчатом конвейере осматривают, маркируют и подают на конвейер разрезки. Эту операцию производят дисковой пилой. Разрезанные шпалы поступают на штабелировщики, где собираются в пакеты по 32 шт., при высоте четыре ряда. Мостовым краном с автоматическим захватом пакеты снимают и устанавливают на площадку для выдержки шпал, после чего они вывозятся на склад готовой продукции [13].

Заключение

Рассматриваемый завод является примером предприятия, которое позволит оптимизировать существующую производственную инфраструктуру и обеспечить рациональное распределение производственных мощностей меж-

ду действующими предприятиями, специализирующимися на выпуске железнодорожной продукции для региональных транспортных систем. Также перепрофилированный завод окажет положительное влияние на строительство и текущее содержание вторых путей на БАМ.

Использование современного оборудования – конвейеров, бетономесителя СМР 500/330 и четырех линий производства железобетонных шпал, может частично удовлетворить потребности в элементах верхнего строения пути Красноярской, Восточно-Сибирской и Западно-Сибирской железных дорог. Это положительно повлияет на ремонт и строительство железнодорожного пути, а также на транспортировочный процесс благодаря увеличению пропускной способности.

Расширение ассортимента продукции шпалопропиточного завода, востребованной в транспортной отрасли и строительстве железно-

дорожных путей, несомненно, окажет влияние на экономическую составляющую предприятия. Это позволит увеличить доходы за счет роста спроса на железобетонные шпалы и брус, а также снизить себестоимость продукции за счет оптимизации производственного процесса и использования современного оборудования.

Перепрофилирование [14–17] завода представляет собой важный шаг в развитии производства железнодорожных материалов с учетом современных требований к надежности железнодорожного пути, экономической выгоды, экологической безопасности для окружающей среды и повышения социальной значимости из-за увеличения рабочих мест. Такая реконструкция служит примером инновационного подхода к модернизации промышленных предприятий [18–20] в условиях стремительно меняющегося мира.

Список литературы

1. Решотинский шпалопропиточный завод АО «ТрансВудСервис» // List-org : сайт. URL : <https://www.list-org.com/company/2047296> (дата обращения 17.04.2025).
2. Продукция Решотинского шпалопропиточного завода поступает на семь железных дорог страны // Победа : сайт. URL : <https://pobeda24.ru/novosti/produkcziya-reshotinskogo-shpalopropitochного-zavoda-postupaet-na-sem-zheleznyh-dorog-strany/> (Дата обращения 17.04.2025).
3. Пат. 147857 Рос. Федерация. Установка для сушки древесины / С.А. Андреев, Ю.А. Судник, С.П. Рудобашта и др. № 2014112298/06 ; заявл. 01.04.2014 ; опубл. 20.11.2014, Бюл. № 32. 2 с.
4. А. с. 724897 СССР. Установка для сушки капиллярно-пористых материалов / Л.-Х.Б. Цимерманис, Е.Л. Высочанский, А.Н. Жестовский. № 2673793/24-06 ; заявл. 09.10.1978 ; опубл. 30.03.1980, Бюл. № 12. 3 с.
5. Пат. 62400 Рос. Федерация. Устройство для закрепления шпал от растрескивания / В.А. Курочкин, Д.А. Науменко, А.Н. Морозов. № 2006138934/22 ; заявл. 03.11.2006 ; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 10. 1 с.
6. Бергер Е.В., Волкова Л.В. Проблемы реконструкции промышленных предприятий при различных условиях и пути их решения // Вестник науки. 2020. Т. 5. № 5 (26). С. 190–198.
7. Эгамов Н.М., Низомадинов И.М. Инновационные технологии реконструкции зданий // Молодой ученый. 2015. № 22 (102). С. 37–39.
8. Пятков Д.А., Спирихов В.В. Проект по частичному перепрофилированию Решотинского шпалопропиточного завода по производству деревянных шпал и брусьев с устройством линии по производству ж/б шпал и брусьев // Университет 20.35 : сайт. URL : <https://pt.2035.university/project/proekt-po-casticnomu-pereprofilirovaniu-rspz-po-proizvodstvu-zb-spal-i-brusev> (дата обращения 26.01.2025).
9. Пятков Д.А., Спирихов В.В. Шпалы с увеличенной площадью опирания: особенности конструкции, преимущества и перспективы применения // Молодежная наука : тр. XXVIII Всерос. студенч. науч.-практ. конф. Красноярск, 2024. Т. 1. С. 235–238.
10. Ленточный транспортер (конвейер) тяжелой серии «LT2» // Compasstech: сайт. URL : <https://compasstech.ru/catalog/lentochnye-konveyery/lentochnyy-konveyer-statsionarnyy-tyazhelya-seriya-lt2/> (дата обращения 26.01.2025).
11. Карпиков Е.Г., Финашин С.С. Технологическая линия для производства железобетонных шпал // Будущее науки-2016 : сб. науч. ст. 4-й Междунар. молодежн. науч. конф. Курск, 2016. Т. 3. С. 161–163.
12. Пат. 2045602 Рос. Федерация. Устройство для смены шпал / А.А. Константинов, В.И. Стеблецов, Гусев В.И. и др. № 93026336/11 ; заявл. 11.05.1993 ; опубл. 10.10.1995.
13. Серенко А.Ф. О совершенствовании технологии производства железобетонных шпал // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2006. № 1 (6). С. 107–111.
14. Фейгельман Н.В. Реструктуризация и перепрофилирование: исследование факторов развития промышленного предприятия // Изв. Тул. гос. ун-та. Экономические и юридические науки. 2016. № 1-1. С. 176–182.
15. Самарина К.С. Перепрофилирование промышленного предприятия в контексте жизненного цикла // Изв. Саратов. ун-та. Новая серия. Сер.: Экономика. Управление. Право. 2012. Т. 12. № 4. С. 61–66.
16. Топчий Д.В., Музыченко С.Г., Гоцоев С.Д. Формирование научно-исследовательской системы организации структуры перепрофилирования промышленных объектов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 3 (30). С. 556–565.

17. Захароченко О.В., Топчий Д.В. Зарубежный и отечественный опыт осуществления функций технического заказчика при перепрофилировании промышленных объектов // Инновации и инвестиции. 2018. № 5. С. 67–70.
18. Гайфуллина М.М., Утешев Р.Р. Стратегии модернизации промышленного предприятия // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2020. № 6-2 (45). С. 185–188.
19. Брагина А.В. Технологическая модернизация промышленных предприятий с использованием инструментария сквозного планирования как основа экономического роста // Экономика и управление. 2021. Т. 27. № 9 (191). С. 741–746.
20. Алферова Т.В., Третьякова Е.А. Проблемы модернизации промышленных предприятий в условиях инновационного развития экономики // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2. URL : https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17689464_71223733.pdf (дата обращения 18.04.2025).

References

1. Reshotinskii shpalopropitochnyi zavod AO «TransVudServis» (elektronnyi resurs) [Reshotinskii sleeper plant of JSC «Transvudservice» (electronic resource)]. Available at: <https://www.list-org.com/company/2047296> (Accessed April 17, 2025).
2. Produktsiya Reshotinskogo shpalopropitochnogo zavoda postupaet na sem' zheleznykh dorog strany (elektronnyi resurs) [The products of the Reshotinskii sleeper plant are supplied to seven railways of the country (electronic resource)]. Available at: <https://pobeda24.ru/novosti/produkcziya-reshotinskogo-shpalopropitochnogo-zavoda-postupaet-na-sem-zheleznykh-dorog-strany/> (Accessed April 17, 2025).
3. Andreev S.A., Sudnik Yu.A., Rudobashta S.P., Semina A.A. Patent RU 147857 U1, 20.11.2014.
4. Zimermanis L.H.-B., Vysochanskii E.L., Zhestovskii A.N. Copyright certificate SU 724897 A2, 30.03.1980.
5. Kurochkin V.A., Naumenko D.A., Morozov A.N. Patent RU 62400 U1, 10.04.2007.
6. Berger E.V., Volkova L.V. Problemy rekonstruktsii promyshlennykh predpriyatii pri razlichnykh usloviyakh i puti ikh resheniya [Problems of reconstruction of industrial enterprises under various conditions and ways to solve them]. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science], 2020, Vol. 5, no 5 (26), pp. 190–198.
7. Egamov N.M., Nizomaddinov I.M. Innovatsionnye tekhnologii rekonstruktsii zdaniy [Innovative technologies of building reconstruction]. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist], 2015, no 22 (102), pp. 37–39.
8. Pyatkov D.A., Spiryukhov V.V. Proekt po chastichnomu pereprofilirovaniyu Reshetinskogo shpalopropitochnogo zavoda po proizvodstvu derevyannykh shpal i brus'ev s ustroystvom linii po proizvodstvu zh/b shpal i brus'ev (elektronnyi resurs) [The project for the partial redesign of the Reshetinskii sleeper plant for the production of wooden sleepers and beams with the installation of a line for the production of railway sleepers and beams (electronic resource)]. Available at: <https://pt.2035.university/project/proekt-po-chastichnomu-pereprofilirovaniu-rspz-po-proizvodstvu-zh-spal-i-brusev> (January 26, 2025).
9. Pyatkov D.A., Spiryukhov V.V. Shpaly s uvelichennoi ploshchad'yu opiraniya: osobennosti konstruktssii, preimushchestva i perspektivy primeneniya [Sleepers with an increased support area: design features, advantages and application prospects]. *Trudy XXVIII Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Molodezhnaya nauka»* [Proceedings of the XXVIII All-Russian Student Scientific and Practical Conference «Youth Science»]. Krasnoyarsk, 2024, Vol. 1, pp. 235–238.
10. Lentochnyi transporter (konveier) tyazheloi serii «LT2» (elektronnyi resurs) [Belt conveyor heavy series «LT2» (electronic resource)]. Available at: <https://compasstech.ru/catalog/lentochnye-konveyery/lentochnyy-konveyer-statsionarnyy-tyazhelyaya-seriya-lt2/> (January 26, 2025).
11. Karpikov E.G., Finashin S.S. Tekhnologicheskaya liniya dlya proizvodstva zhelezobetonnykh shpal [Technological line for the production of reinforced concrete sleepers]. *Sbornik nauchnykh statei 4-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii «Budushchee nauki-2016»* [Proceedings of the 4th International Youth Scientific Conference «The future of science-2016»]. Kursk, 2016, Vol. 3, pp. 161–163.
12. Konstantinov A.A., Stebletsov V.I., Gusev V.I., Novikov E.K., Tarasov S.V. Patent RU 2045602 C1, 10.10.1995.
13. Serenko A.F. O sovershenstvovanii tekhnologii proizvodstva zhelezobetonnykh shpal [On the improvement of the production technology of reinforced concrete sleepers]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Petersburg State Transport University], 2006, no 1 (6), pp. 107–111.
14. Feigel'man N.V. Restrukturizatsiya i pereprofilirovanie: issledovanie faktorov razvitiya promyshlennogo predpriyatiya [Restructuring and reprofiling: research of factors of industrial enterprise development]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomicheskie i yuridicheskie nauki* [Bulletins of the Tula State University. Economic and law sciences], 2016, no 1-1, pp. 176–182.
15. Samarina K.S. Pereprofilirovanie promyshlennogo predpriyatiya v kontekste zhiznennogo tsikla [The redesign of an industrial enterprise in the context of its life cycle]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Ekonomika. Upravlenie. Pravo* [Bulletins of the Saratov University. A new series. Series: Economics. Management. Right], 2012, Vol. 12, no 4, pp. 61–66.
16. Topchii D.V., Muzychenko S.G., Gotsoev S.D. Formirovanie nauchno-issledovatel'skoi sistemy organizatsii struktury pereprofilirovaniya promyshlennykh ob'ektov [Formation of a scientific research system for organizing the structure of the redesign of industrial facilities]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* [Bulletins of the highest educational organizations. Investment. Building. Realty], 2019, Vol. 9, no 3 (30), pp. 556–565.
17. Zakharochenko O.V., Topchii D.V. Zarubezhnyi i otechestvennyi opyt osushchestvleniya funktsii tekhnicheskogo zakazchika pri pereprofilirovanii promyshlennykh ob'ektov [Foreign and domestic experience of performing the functions of a technical customer in the conversion of industrial facilities]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments], 2018, no 5, pp. 67–70.
18. Gaifullina M.M., Uteshev R.R. Strategii modernizatsii promyshlennogo predpriyatiya [Industrial enterprise modernization strategies]. *Mezhdunarodnyi zhurnal humanitarnykh i estestvennykh nauk* [International Journal of Humanities and Natural Sciences], 2020, no 6-2 (45), pp. 185–188.

19. Bragina A.V. Tekhnologicheskaya modernizatsiya promyshlennykh predpriyatii s ispol'zovaniem instrumentariya skvoz-nogo planirovaniya kak osnova ekonomicheskogo rosta [Technological modernization of industrial enterprises using end-to-end planning tools as a basis for economic growth]. *Ekonomika i upravlenie* [Economics and management], 2021, Vol. 27, no 9 (191), pp. 741–746.

20. Alferova T.V., Tret'yakova E.A. Problemy modernizatsii promyshlennykh predpriyatii v usloviyakh innovatsionnogo razvitiya ekonomiki [Problems of modernization of industrial enterprises in the context of innovative economic development]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2012, no 2. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17689464_71223733.pdf (Accessed April 18, 2025).

Информация об авторах

Пятков Дмитрий Александрович, кафедра строительства железных дорог, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск; e-mail: d.pyatkov@list.ru.

Курочкин Валерий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства железных дорог, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск; e-mail: kurochkin_va@krsk.irkups.ru.

Жестовский Анатолий Николаевич, старший преподаватель кафедры строительства железных дорог, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск; e-mail: zhestanatul@yandex.ru.

Information about the authors

Dmitrii A. Pyatkov, Department of Building of Railways, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – Branch of the Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk; e-mail: d.pyatkov@list.ru.

Valerii A. Kurochkin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Building of Railways, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – Branch of the Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk; e-mail: kurochkin_va@krsk.irkups.ru.

Anatolii N. Zhestovskii, Assistant Professor of the Department of Building of Railways, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – Branch of the Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk; e-mail: zhestanatul@yandex.ru.

Достоверность реализованной предиктивной аналитики состояния железнодорожного пути в ОАО «РЖД», направления по совершенствованию предиктивного анализа

Т.Н. Асалханова✉, А.А. Осолков

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉asalk-tatyana@yandex.ru

Резюме

Пропускная способность дорог Восточного полигона системно увеличивается: в 2013 г. она составляла 97,8 млн т, в 2024 г. – 180 млн т, однако требования отправителей грузов заставляют повышать этот показатель. Его планируемый уровень к 2032 г. – 270 млн т. Ежегодное расширение объемов грузовых перевозок на Восточном полигоне приводит к росту затрат на ремонт и текущее содержание путевой инфраструктуры, обеспечивать которое становится все сложнее, так как для реализации стратегии повышения грузопотока оптимизируются не только межпоездные интервалы, но и время технологических «окон». В связи с этим руководителям работ хозяйства пути недопустимо совершать ошибки при их планировании, в том числе в определении приоритетов устранения неисправностей. Но без понимания фактического состояния пути, а также достоверных ожидаемых последствий, т.е. полного спектра предиктивного анализа, выполнить задачу перехода на обслуживание железнодорожного пути по фактическому состоянию не представляется возможным. Компанией АО «Фирма Твема» по заказу ОАО «РЖД» создана информационно-аналитическая система диагностики и мониторинга железнодорожной инфраструктуры, которая является частью Единой корпоративной системы управления инфраструктурой. В ней был разработан раздел предиктивного анализа состояния геометрических параметров железнодорожного пути, однако полученные данные спустя несколько месяцев в большинстве случаев не нашли подтверждения. Реализованная методика предиктивного анализа пока что не дает точных результатов, поскольку не охватывает весь спектр трех областей анализа, кроме того, не учитывается многофакторная система деградационного процесса состояния пути. Предиктивный анализ – сложный процесс диагностики как текущего состояния путевой инфраструктуры, так и предполагаемых последствий. Используя только математические модели прогнозирования неисправностей без применения расчетов взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути, невозможно получить достоверные сведения, поскольку не все повреждения имеют ретроспективные ряды деградационного процесса, а также есть ситуации, где дефекты еще отсутствуют, но в ближайшее время сформируются по причине конструктивных характеристик пути и условий эксплуатации. В предиктивном анализе важна консолидация логических ситуаций, связанных с особенностями влияния геометрических параметров пути на возникающие силовые перегрузки под воздействием подвижного состава с целью дальнейшего снижения силового фактора и продления ресурса железнодорожного пути. Совершенствование предиктивного анализа на данный момент является актуальным направлением.

Ключевые слова

предиктивный анализ, деградация состояния пути, информационные системы, комплексная диагностика и мониторинг, железнодорожная инфраструктура, Единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой, конструктивные параметры пути, области предиктивной аналитики, железнодорожный путь, факторы деградационного процесса, мобильные средства диагностики

Для цитирования

Асалханова Т.Н. Достоверность реализованной предиктивной аналитики состояния железнодорожного пути в ОАО «РЖД», направления по совершенствованию предиктивного анализа / Т.Н. Асалханова, А.А. Осолков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 84–99. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).84-99.

Информация о статье

поступила в редакцию: 18.06.2025 г.; поступила после рецензирования: 24.06.2025 г.; принята к публикации: 25.06.2025 г.

Reliability of the implemented predictive analytics of the state of the railway track in JSC Russian Railways, directions for improving the predictive analysis

T.N. Asalkhanova✉, A.A. Oskolkov

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉asalk-tatyana@yandex.ru

Abstract

The capacity of the Eastern polygon of roads is systematically increasing: in 2013 it amounted to 97,8 million tons and increased to 180 million tons in 2024, however the requirements of the consignors of goods force to increase the capacity limits. By 2032, the goal is to further increase the throughput capacity to the milestone of 270 million tons. The annual growth in freight traffic on the Eastern Polygon increases the cost of repairs and maintenance of the track infrastructure. It is becoming increasingly difficult to maintain the track infrastructure, since in order to implement a strategy to increase cargo flow, not only inter-train intervals are optimized, but also the time of technological «windows», therefore, it is unacceptable for managers of track maintenance to make mistakes when planning work, including those in prioritizing troubleshooting. But without understanding the actual condition of the track, as well as reliable predicted consequences, it is not possible to perform the task of switching to railway track maintenance based on the actual condition of the full range of predictive analysis. JSC «Tvema Company» commissioned by JSC «Russian Railways» has created an information and analytical system for diagnostics and monitoring of railway infrastructure, which is part of a Unified Corporate Infrastructure Management System. It has developed a section of predictive analysis of the geometric parameters of the railway track, but the results obtained after a few months in most cases have not been confirmed. The implemented predictive analysis technique does not yet provide accurate results, since it does not cover the full range of the three areas of analysis, and the multifactorial system of the degradation process of the track condition is also not taken into account. Predictive analysis is a complex process of analyzing both the current state of the track infrastructure and the expected consequences. Using only mathematical models for predicting malfunctions without using calculations of the interaction of rolling stock and railway track, it is impossible to obtain reliable data, since not all malfunctions have retrospective series of the degradation process, and there are also many situations where malfunctions are still absent, but will form in the near future due to the structural features of the track and operating conditions. In predictive analysis, it is important to consolidate logical situations related to the peculiarities of the influence of geometric parameters of the track on the resulting power overloads under the influence of rolling stock in order to further reduce the power factor and prolong the life of the railway track. The direction of improving predictive analysis is currently an urgent topic.

Keywords

predictive analysis, degradation of the track, information systems, complex diagnostics and monitoring, railway infrastructure, Unified corporate automated infrastructure management system, design parameters of the track, areas of predictive analytics, railway track, factors of the degradation process, mobile diagnostic tools

For citation

Asalkhanova T.N., Oskolkov A.A. Dostovernost' realizovannoi prediktivnoi analitiki sostoyaniya zheleznodorozhnogo puti v OAO «RZhD», napravleniya po sovershenstvovaniyu prediktivnogo analiza [Reliability of the implemented predictive analytics of the state of the railway track in JSC Russian Railways, directions for improving the predictive analysis]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 84–99. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).84-99.

Article Info

Received: June 18, 2025; Revised: June 24, 2025; Accepted: June 25, 2025.

Введение

Правительством России перед холдингом ОАО «РЖД» поставлена задача дальнейшего увеличения пропускной способности на дорогах Восточного полигона: практически в 1,5 раза к 2032 г. Ежегодный рост объемов грузовых перевозок увеличивает затраты на ремонт и текущее содержание путевой инфраструктуры [1–3].

Тенденции современных подходов к обслуживанию железнодорожного пути сводятся к совершенствованию системы планирования работ на основе фактического и прогнозного состояния пути. Применяемые мобильные средства диагностики (МСД) при проверке состояния пути на текущий момент не позволяют определить объективное состояние железнодорожного пути, так как для этого важно учитывать не только последние измеренные парамет-

ры, но и анализировать ретроспективный ряд предыдущих измерений, а также учитывать силовое взаимодействие подвижного состава с железнодорожным путем – т.е. выполнять предиктивный анализ для определения фактического и прогнозного состояния пути.

Суть предиктивного анализа заключается в ранжировании неисправностей по их объективному уровню деградационного развития. Идеализированное решение задачи сводится к разработке методики предиктивного анализа, которая позволит выделить из множества выявленных дефектов (в том числе потенциальных) не только неотложные, первоочередные и плановые, как это определяют современные средства диагностики, распределяя неисправности геометрических параметров рельсовой колеи по степеням, но и установить, какие из первоочередных и плановых повреждений должны быть

устранены как неотложные, какие плановые неисправности должны быть устранены в первоочередном порядке, а также в какой срок каждая индивидуальная поломка может перейти в более критичную степень [4, 5].

Высокая интенсивность развития данных дефектов рельсового хозяйства по четному пути свидетельствует не только о конструктивно сложном плане и профиле путевой инфраструктуры, но и интенсивном процессе грузовых перевозок с невыполнением проектного скоростного режима и возникновением существенных контактных напряжений в системе «колесо – рельс» [6–8].

Цель данной статьи заключается в проведении проверки результатов достоверности методики предиктивного анализа, реализованного в Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой – модуль «Система диагностики и мониторинга инфраструктуры (ЕК АСУИ СДМИ), и определении тенденции дальнейшего развития исследовательской работы по совершенствованию подходов предиктивной аналитики.

Постановка проблемы

В настоящее время вопросам предиктивного анализа и прогнозирования состояния железнодорожного пути посвящено много научных статей, разработан программный комплекс ОАО «РЖД» ЕК АСУИ СДМИ, но при этом нет четкой методики определения прогнозного состояния элементов верхнего строения пути (ВСП) при воздействии тяжеловесного подвижного состава и влияния скоростного движения на путь. Таким образом, в статье рассматривается проблема в отношении достоверности данных, получаемых в ЕК АСУИ СДМИ, и предложен вариант усовершенствования методики предиктивного анализа железнодорожного пути.

С целью решения поставленной проблемы и проведения анализа формируемых результатов предиктивной аналитики в системе принят участок четного железнодорожного пути одной из дистанций пути – самый сложно преодолеваемый железнодорожный рубеж Транссибирской магистрали на Восточно-Сибирской железной дороге. Данный участок проходит по сложному горно-перевальному ландшафту с постоянными уклонами, где протяженность железнодорожного пути с уклона-

ми менее 10 % составляет 82 км, с уклонами от 10–18 ‰ – 48 км, более 18 ‰ – 3,6 км, при этом в совокупности со сложным профилем участок усугублен большим количеством кривых малого радиуса: $R < 350$ м – 117 шт.; $350 < R < 600$ м – 80 шт.; $600 < R < 800$ м – 40 шт. Характерными расстройствами исследуемого участка являются высокая интенсивность бокового износа рельсов и наличие контактно-усталостных трещин на поверхности катания неупорной (перешивочной) рельсовой нити [3].

Просадки и перекосы железнодорожного пути в большинстве случаев формируются по нижней рельсовой нити. Эти деформации возникают вследствие неравномерного распределения усилия колес на упорный и неупорный (нижний) рельс при проезде кривых участков пути со скоростью ниже скорости равновесного движения (рис. 1) [9–11]. По анализу данных о количестве выявленных неисправностей геометрических параметров рельсовой колеи, сформированных в системе с октября 2024 г. по март 2025 г. видна закономерность стабилизации пути при замерзании элементов рельсовых креплений, балластного слоя и земляного полотна в период отрицательных температур, при этом наблюдается существенное уменьшение числа неисправностей с прогрессирующим развитием. Снижение количества развития дефектов в значительной степени происходит не только в профиле пути (перекос – П, просадка – Пр), но и стабилизируется ширина рельсовой колеи, а также отступления в плане пути (Р – отступления пути в плане по рельсовым нитям железнодорожного пути).

Если рассматривать выявленные неисправности в долевого сегменте, то 76 % из них будут профильными, где преобладают П (47 %) и Пр (29 %); третье место занимают Р – 16 %; на четверной позиции уширения рельсовой колеи (УШ) – 7 %; на пятой сужения (Суж) – 1 % (рис. 2).

На рис. 3 показана динамика развития неисправностей в профиле пути с осени 2024 г. по весну 2025 г., где наблюдается существенное сокращение неисправностей при замерзании пути.

В табл. 1 систематизированы данные о прогнозных отступлениях геометрии рельсовой колеи с октября 2024 г. по март 2025 г. из раздела ведомости предиктивного анализа ЕК АСУИ СДМИ (далее – Методика).

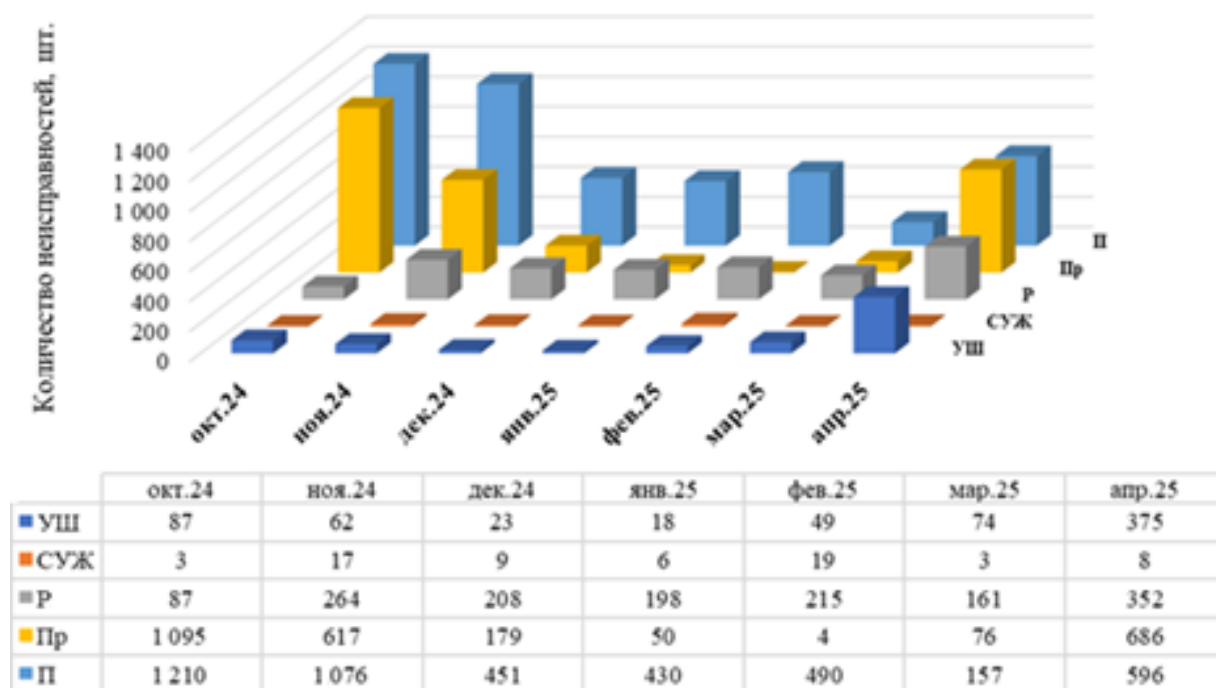


Рис. 1. Динамика прогрессирующих неисправностей пути с октября 2024 г. по апрель 2025 г.

Fig. 1. Dynamics of progressive track faults from October 2024 to April 2025

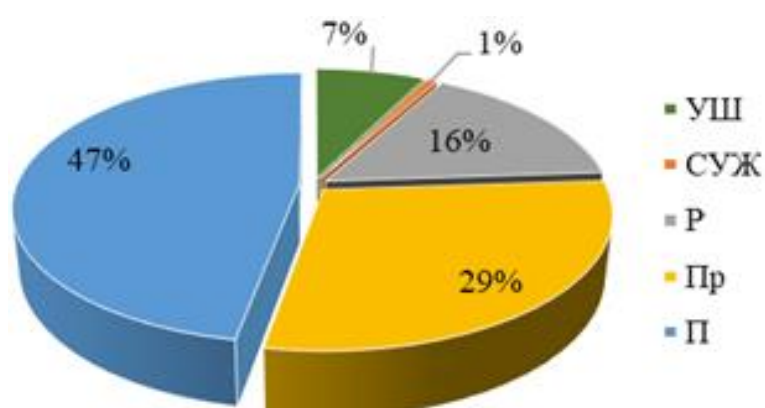


Рис. 2. Распределение выявленных неисправностей в долях

Fig. 2. Distribution of detected malfunctions in percentages

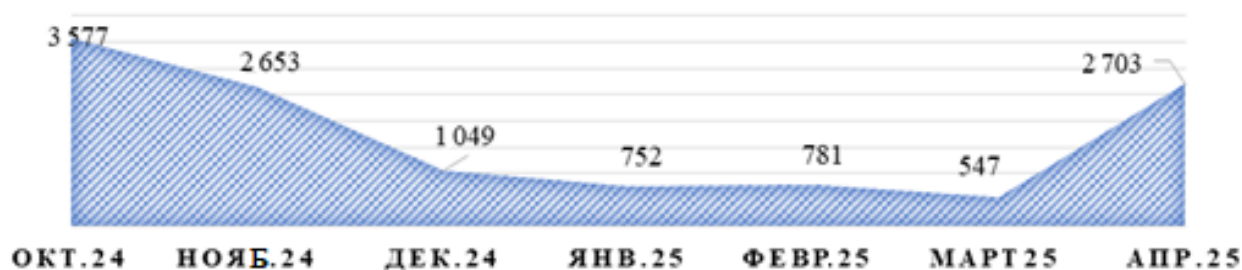


Рис. 3. Динамика неисправностей в профиле пути второй степени

Fig. 3. Dynamics of failures in the track profile in the second degree

Таблица 1. Сопоставление количества прогнозируемых данных выявленным неисправностям
Table 1. Correlation of the number of forecasted data identified malfunctions

Месяц Month	Прогноз повышения степени неисправностей через 3 месяца Forecast of an increase in the severity of malfunctions within 3 months				Фактически выявлено неисправностей Actually detected faults			
	2 степень degree	2к3	3 степень	4 степень	2 степень	2к3	3 степень	4 степень
окт. 24	1 718	565	197	48	2 860	362	81	9
нояб. 24	305	417	125	17	2 033	190	15	1
дек. 24	119	137	45	9	1 071	50	10	1
январ. 25	186	262	80	10	642	48	3	1
февр. 25	99	143	36	26	866	60	12	3
март 25	634	161	63	34	469	29	3	0
апр. 25	216	256	141	63	2 016	182	65	26

Согласно представленному анализу (см. табл. 1), просматривается зависимость уменьшения количества прогнозируемых в трехмесячный период неисправностей с прогнозным повышением степени критичности при наступлении периода отрицательных температур. Однако реализованный в системе алгоритм предиктивного анализа и математические модели спрогнозировали с октября 2024 г. на январь 2025 г. появление 48 неисправностей в профиле пути 4-й степени, 197 неисправностей – 3-й степени, но фактически в январе 2025 г. МСД выявили по одной неисправности 4-й и 3-й степеней, т.е. методика предиктивного анализа, реализованная в системе, не учитывает сезонность и климатические особенности территории, а работает по принципу прямого математического прогноза.

По анализу данных в ЕК АСУИ СДМИ можно сделать следующий вывод: по методике в системе рассчитывается самопроизвольное понижение степени неисправности пути (рис. 4). Например, в апреле 2025 г. по фактическим данным МСД на горноперевальном участке пути за исследуемый период выявлены просадки пути 4-й степени критичности с амплитудой 26–33 мм, а в системе прогноз развития неисправности на три месяца показал самовосстановление железнодорожного пути с уменьшением амплитуды неисправности до уровня 3-й и 2-й близкой к 3-й степени (2к3) неисправности. Этот случай также подтверждает отсутствие в методике функции учета сезонности и логического алгоритма определения

деградации пути с наступления потепления, когда при оттаивании балластного слоя неисправности в профиле пути неспособны к самостранению.

Также не совсем понятна ситуация прогноза при оценке перекосов пути в осенне-зимний и весенний периоды года и на других сложных участках пути с наличием большого количества кривых малого радиуса, когда ежемесячно МСД выявлялись перекосы пути со степенью 2к3. Неисправности находились в стабилизированной фазе, но, согласно методике, в системе неоднократно прогнозировалась 4-я степень. Однако повреждения МСД не подтвердились с января по март 2025 г., а в апреле 2025 г. была зафиксирована уже 3-я степень неисправности в профиле пути.

По данным системы, методика не выявляет факт многократно повторяющихся неисправностей из месяца в месяц при отсутствии устранения, что приводит к дальнейшей деградации в условиях сезонного оттаивания железнодорожного пути, и вновь МСД зафиксирована неисправность 2к3, которая в апреле по факту деградировала до 3-й степени (рис. 5).

Локальные места с многократными повторами неисправностей не носят массовый характер, но эти проблемные очаги путевых отступлений возможно выявить именно с помощью предиктивного анализа при учете сезонности, а также геофизических процессов, что позволит спрогнозировать неисправность с высокой точностью.

В исследовании использовался метод экспоненциального сглаживания с параметром высокой вероятности [12, 13]. По результатам

Координата	НЕИСП.	Амплитуда	Длина, м	Степень	Координата	Амплитуда	Длина, м	Степень	Путь	Дата
853	Пр.пр	30	6	4	853	22	5	3	0	апр.25
858	Пр.лв	32	4	4	858	24	5	3	0	апр.25
836	Пр.лв	28	5	4	836	27	5	4	0	апр.25
982	Пр.лв	31	4	4	982	23	5	3	0	апр.25
982	Пр.пр	31	4	4	982	24	5	3	0	апр.25
16	Пр.лв	26	5	4	16	22	6	3	0	апр.25
16	Пр.пр	28	5	4	16	22	5	3	0	апр.25
42	Пр.лв	32	3	4	42	20	5	2к3	0	апр.25
42	Пр.пр	33	3	4	42	22	5	3	0	апр.25
242	Пр.лв	28	4	4	242	19	5	2к3	0	апр.25
433	Пр.пр	26	4	4	433	19	5	2к3	0	апр.25

Рис. 4. Прогноз понижения степени выявленных в профиле пути неисправностей

Fig. 4. Forecast of the decrease in the degree of identified faults in the profile track

Координата	НЕИСП.	Амплитуда	Длина, м	Степень	Координата	Амплитуда	Длина, м	Степень	Путь	Дата
622	П	17	18	3	622	34	17	4	1	фев.25
623	П	17	18	3	624	19	16	3	0	апр.25
625	П*	16	19	2к3	625	20	18	3	1	окт.24
625	П*	16	18	2к3	625	26	18	4	1	ноя.24
626	П*	15	18	2к3	626	25	18	4	1	дек.24
627	П*	17	18	3	628	20	18	3	0	апр.24
627	П*	15	18	2к3	627	25	18	4	1	ноя.24
629	П*	16	18	2к3	629	28	18	4	1	дек.24
630	П	16	18	2к3	630	18	16	3	1	апр.25
631	П*	15	18	2к3	632	25	18	4	1	окт.24
634	П*	14	16	2к3	634	25	16	4	1	январ.25
634	П	16	16	2к3	634	27	16	4	1	фев.25
639	П	15	18	2к3	639	25	18	4	1	мар.25

Рис. 5. Многократно повторяющиеся неисправности пути в сочетании с сезонностью

Fig. 5. Repeated track failures combined with seasonality

расчетов определена динамичная кривая развития перегиба пути, где амплитуда неисправности в мае составит 23 мм, а по данным методики, заложенной в системе, 23 мм ожидается только через два месяца (в июле 2025 г.), что может привести к неэффективным мерам по текущему обслуживанию участков пути и неоправданным затратам.

На рис. 6 отражен построенный прогноз развития многократно повторяющейся неисправности по «Ведомости прогнозируемых отступлений геометрии рельсовой колеи» в системе. При этом, анализируя полноту данных в системе, установлено отсутствие учета дополнительного прохода МСД, где в октябре 2024 г. обнаружена 3-я степень перегиба пути, и в отчетности сформировано выявленное значение неисправности при следующем контрольном проходе. Для построения максимально точного прогноза важно использовать все имеющиеся полученные данные МСД.

Согласно проведенным расчетам экстраполяции развития неисправности, зафиксированной по данным от нижнего экстремума, и дальнейшего развития дефекта с постоянным увеличением амплитуды до последнего развития неисправности, превышающего последующие, определено, что прогнозируемая методикой амплитуда перегиба пути 23 мм в июле 2025 г. соответствует линейному тренду. На рис. 7 он представлен в виде зеленой линии. Эта методика не смогла бы определить рост неисправности до величины 18 мм в апреле 2025 г. без учета параметра сезонности (оранжевый тренд).

Предлагаемый авторами метод экспоненциального сглаживания более актуален, так как он придает большее значение самым последним показателям ретроспективного ряда, поэтому в первом приближении близок к реальной ситуации, так как после периода отрицательных температур наступает оттаивание балластного слоя

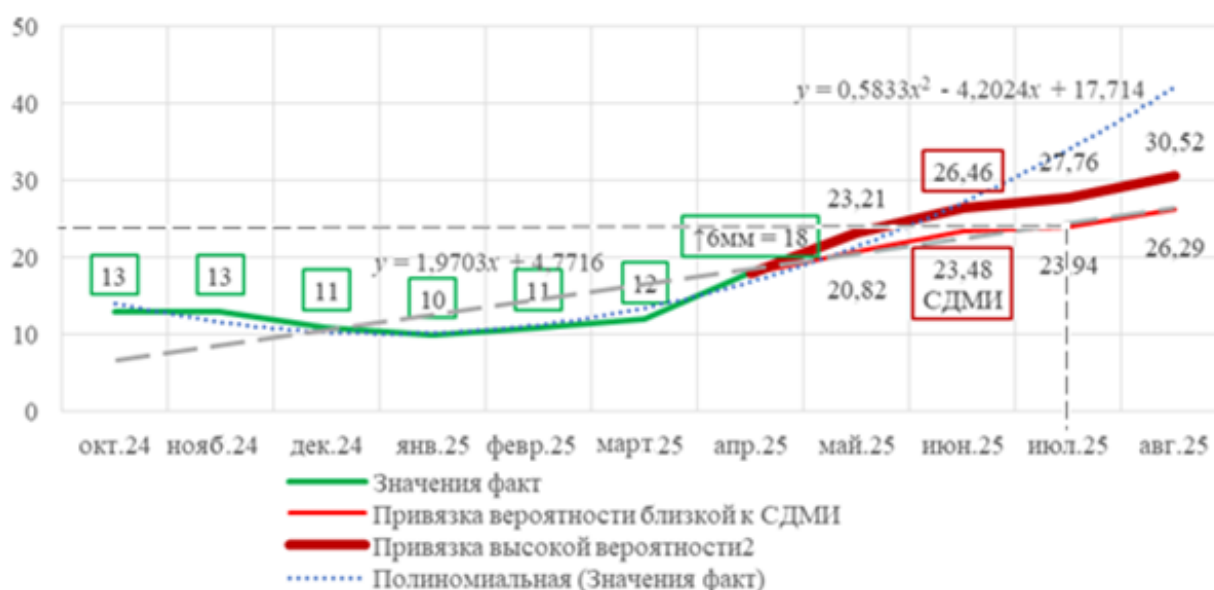


Рис. 6. Прогноз развития неисправности методом экспоненциального сглаживания высокой вероятности развития перекоса пути

Fig. 6. Fault development forecast using exponential smoothing: high probability of track skew development

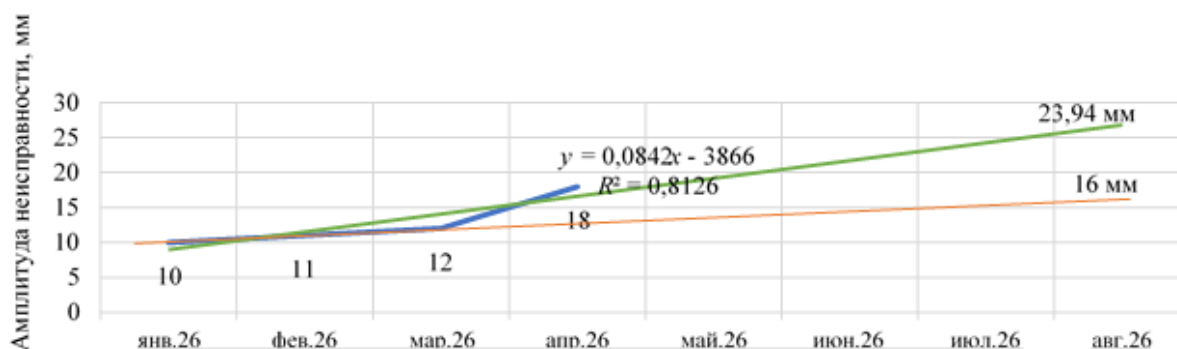


Рис. 7. Линейная экстраполяция данных положительного развития перекоса пути

Fig. 7. Linear extrapolation of data on the positive development of track deviation

и происходит наиболее динамичное развитие неисправностей в профиле пути (рис. 8).

Прогнозные значения тренда линейной экстраполяции рассчитывается по (1):

$$y = a + b \cdot x, \quad (1)$$

где y – прогнозируемое значение; a – начальное значение; b – коэффициент наклона; x – интервал времени.

Коэффициент наклона b можно определить как частное суммарной разницы экстремумов графика положительного развития (Δy_{i+}) и отрицательного (Δy_{i-}) на интервал времени x по (2):

$$b = \frac{(\Delta y_{i+} + \Delta y_{i-})}{x}. \quad (2)$$

С целью определения наиболее эффективной методики прогнозирования рассмотрим

диаграмму (см. рис. 8). Построен прогноз линейной экстраполяции (ЕК АСУИ СДМИ, первый метод) и экспоненциального сглаживания (второй метод), из которого видно, что в результате весенней оттайки балласта в апреле 2025 г. произошло резкое увеличение амплитуды перекоса пути с 12 до 18 мм, в итоге линейный тренд, применяемый в системе, дал некорректный прогноз развития неисправности (+1 мм), т.е. 13 мм, когда привязка высокой вероятности второй методики при учете прошлых данных дала наиболее близкий результат – 16,23 мм.

Последний результат основывается на прогнозировании будущего по данным прошлого, где вес последних измерений приоритетнее [12].

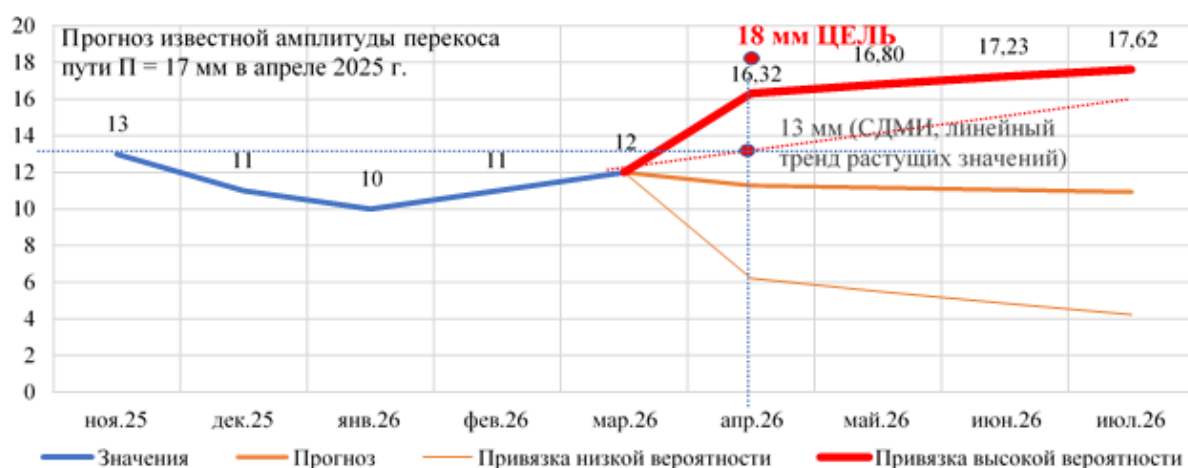


Рис. 8. Сравнение прогноза известной величины перекоса пути 18 мм в апреле 2025 г.

Fig. 8. Comparison of the forecast of the known value of track twist 18 mm in April 2025

Прогнозные значения по методу экспоненциального сглаживания рассчитываются по (3):

$$y_{t+1} = (p \cdot y_t + (1-p) \cdot U_t) \cdot (P \cdot S) \cdot S_{SP-1}, \quad (3)$$

где p – параметр сглаживания; y_{t+1} – прогнозируемый показатель; U_t – экспоненциально взвешенная средняя для периода предшествующего прогнозу; y_t – фактическое значение исследуемого показателя за период, предшествующий прогнозу; $t+1$ – прогнозный период; S – сезонная компонента, рассчитанная отдельно с помощью простого экспоненциального сглаживания; P – количество прогнозных периодов вперед; S_{SP-1} – коэффициент сезонности за этот же период в последнем сезоне (для мультипликативной модели, когда сезонная компонента представляет собой долю трендового значения).

Проведенный анализ демонстрирует важность совершенствования применяемой методики предиктивного анализа, в том числе заложенного в методику системы [14].

Направления совершенствования предиктивного анализа

В результате исследования и расчетов можно сделать вывод, что реализованная в ЕК АСУИ СДМИ прогнозная аналитика не способна полностью охватить все ситуации предсказания последствий и сроков их наступления.

Разделение предиктивной аналитики на области является важным моментом для обеспечения эффективного перехода на обслуживание объектов инфраструктуры по реальному техническому состоянию и быстрому реагиро-

ванию на изменения состояния объектов инфраструктуры [13].

Важно в текущих сложных условиях оптимизации расходов ОАО «РЖД» добиться уменьшения отказов и рисков, связанных с железнодорожным путем, повышения ресурса железнодорожной инфраструктуры, снизить количество внеплановых ремонтов, прогнозировать и контролировать сроки жизненного цикла элементов инфраструктуры, при этом соблюдать все условия: выполнение технологических процессов обслуживания объектов инфраструктуры, безопасность перевозочного процесса, установленные скорости движения подвижного состава.

В табл. 2 представлена предлагаемая формализация разграничения областей предиктивной аналитики, которые позволят принимать эффективные решения на различных стадиях бизнес-процессов по текущему содержанию железнодорожного пути. Выбраны следующие области предиктивной аналитики: конструктивная, оперативная и плановые, которые способны охватить практически весь спектр рассматриваемых деградационных качеств путейой инфраструктуры.

Важной областью является конструктивная, где на основе силового воздействия возможно определить точечные напряженные состояния в элементах ВСП и выполнить сопоставления с допускаемыми величинами. При этом результаты будут формализовать не проблемные элементы, где превышены допуски, а последствия, к которым приведет конкретное отклонение [8].

Таблица 2. Три области реализации предиктивной аналитики

Table 2. Three areas of implementation of predictive analytics

Показатель Indicator	Конструктивная Constructive	Оперативная Operational	Плановая Planned
Назначение области Assignment of the area	<p>Определяет потенциальное появление неисправностей на основе силового взаимодействия подвижного состава на конструкцию железнодорожного пути. Оценка физических процессов взаимодействия является основой предиктивной системы, ориентированной на повышении ресурса эксплуатации железнодорожного пути</p> <p>Identifies potential faults based on the force interaction between rolling stock and the track structure. Assessing the physical processes of interaction forms the basis of a predictive system aimed at increasing the operational life of the track.</p>	<p>Работает на основе анализа сочетаний неисправностей, а также прогнозирования ранее выявленных неисправностей пути и выполняет оценку резкой фазы развития [1] неисправности пути для точного определения, какие плановые неисправности, выявленные средствами диагностики должны быть устранены в неотложном или первоочередном режиме, а также какие из первоочередных неисправностей должны быть устранены в неотложном режиме</p> <p>It operates on the basis of the analysis of combinations of faults, as well as the prediction of previously identified faults of the track and carries out an assessment of the acute phase of development [1] of the fault of the track to accurately determine which planned faults identified by diagnostic tools should be eliminated in an urgent or priority mode, as well as which of the priority faults should be eliminated in an urgent mode</p>	<p>Определяет неисправности контролируемого длительного развития. Работает на анализе исторических данных с применением методов экстраполяционного прогнозирования на длительную перспективу, где определяются фазы развития [1] системно развивающихся неисправностей, а также неисправностей, находящихся в фазе стабилизации [1]. Много общего с ЕК АСУИ СДМИ – предиктивный анализ, нужна доработка метода</p> <p>Identifies faults with controlled long-term development. It works by analyzing historical data using long-term extrapolation forecasting methods, which identifies the development phases [1] of systemically developing faults, as well as faults in the stabilization phase [1]. It has much in common with the EC ASMS SDMI – predictive analysis; the method requires further refinement.</p>
Функциональное описание Functional description	<p>Фактические (на начальной стадии) и потенциальные неисправности могут быть определены при оценке комплексного взаимодействия конструкции железнодорожного пути, метеофизических факторов, характеристик подвижного состава и реализуемых режимов движения грузовых поездов. Появление</p>	<p>Практически у каждой неисправности пути есть история деградационного процесса. Базируясь на хронологическом ряде данных образования неисправности при использовании экстраполяционного прогнозирования с приоритетом последнего измерения, а также с учетом сезонности, состояния балласта, кон-</p>	<p>Одним из частных примеров данной области является прогноз бокового износа или прогноз износа металлических частей стрелочного перевода. Развития уширения рельсовой колеи при нарастании бокового износа, дефектности скреплений и шпал. Деградация неисправностей в профиле пути при</p>

	<p>ние неисправностей в данной области практически не поддается классическим методам прогнозирования по причине недостаточного количества данных. Однако при анализе силового воздействия на верхнее строение пути реально определить последствия, основанные на законах физики</p> <p>Actual (initial stage) and potential faults can be identified by assessing the complex interactions between track structure, meteorological factors, rolling stock characteristics, and freight train operating modes. Fault occurrence in this area is virtually impossible to predict using classical forecasting methods due to insufficient data. However, by analyzing the force impact on the track superstructure, it is possible to determine the consequences based on the laws of physics.</p>	<p>струкции рельсошпальной решетки, искусственных сооружений и метеофизических процессов, возможно точно определить критичность и резкую фазу развития неисправности [1]</p> <p>Almost every track fault has a history of degradation. Based on a chronological series of fault formation data using extrapolative forecasting with priority given to the most recent measurement, as well as taking into account seasonality, ballast condition, track grid design, artificial structures, and meteorological processes, it is possible to accurately determine the criticality and acute phase of fault development [1].</p>	<p>содержании стыков, дефектности рельсов, состоянии балласта и искусственных сооружений. В ряде случаев устранять нужно не саму неисправность, а ее взаимосвязанную причину</p> <p>One specific example in this area is the prediction of lateral wear or wear of metal parts of a turnout. The development of track gauge widening with increasing lateral wear, defective fastenings, and sleepers. The degradation of track profile defects due to joint maintenance, rail defects, ballast condition, and artificial structures. In some cases, it's not the defect itself that needs to be addressed, but its underlying cause.</p>
Важность Importance	<p>Без принятия своевременных мероприятий обслуживания пути появление связанных критических неисправностей будет неизбежно</p> <p>Without timely implementation of track maintenance measures, the occurrence of related critical faults will be inevitable.</p>	<p>Неисправности планового характера могут быть опаснее первоочередных и некоторых неотложных при сочетании ряда факторов</p> <p>Planned malfunctions can be more dangerous than priority and some urgent ones when a number of factors combine</p>	<p>Не все неисправности пути планового характера имеют системную деградацию, большая часть в тренде стабилизации [1]</p> <p>Not all planned track failures are systemic degradation, most are in a stabilizing trend [1]</p>
Цель Target	<p>Рекомендации производства работ для повышения ресурса пути</p> <p>Recommendations for the execution of works to increase the resource of the track</p>	<p>Рациональная расстановка приоритетов на основе фазы динамического развития [1]</p> <p>Rational prioritization based on the dynamic development phase [1]</p>	<p>Рационализация отбора планирования устранения конкретных неисправностей и причин их образования</p> <p>Rationalization of the selection of planning for eliminating specific malfunctions and the reasons for their occurrence</p>

Выполнить классический экстраполяционный прогноз или сложный многофакторный прогноз состояния конструктивной проблемы фактического состояния пути далеко не просто, так как не всегда имеется достаточно данных в ретроспективе локального места пути. Поэтому конструктивная область предиктивного анализа на основе силового взаимодействия элементов ВСП и подвижного состава является крайне важным вопросом для текущего содержания пути и обеспечения безопасности движения.

Не менее важна область оперативного предиктивного анализа, где важно определить для каждой выявленной неисправности пути динамику деградации (важна фаза резкого развития и определение опасных сочетаний). Важным понятием здесь является то, что современные средства диагностики до сих пор не выполняют анализ скорости развития неисправности, где первоочередная неисправность может быть определена как наименее опасная, чем плановая. В данном смысловом контексте актуальной задачей оперативной области является определение реального приоритета плановых и первоочередных неисправностей пути с учетом скорости их развития и отягчающих сочетаний. Примером может быть ситуация резкого появления угла в плане «Р» 2-й степени при наличии нулевого стыкового зазора (0 мм) либо зазора между шпалой и балластом.

Плановая область предиктивного анализа может быть построена при использовании экстраполяционного прогноза хронологического ряда ее развития при обязательном учете сезонности, предыдущих состояний и последней фазы деградационного процесса, а также жизненного цикла элементов железнодорожного пути [13, 15, 16].

В данной области важно определить фазу системно развивающейся неисправности с дальнейшим планированием сроков устранения и установления неисправности пути, находившийся в фазе стабилизации, как наименее приоритетных задач для ликвидации. Частным примером может являться системный рост уширения рельсовой колеи, возникающий в результате нарастания бокового износа рельсов и износа элементов креплений. В качестве второго примера может быть системное развитие профильной неисправности при ненадле-

жащем содержании дренажных искусственных сооружений или их отсутствии. При этом для качественного устранения дефекта важно убрать не только саму неисправность, но и причину ее системного развития.

Представленные области предиктивной аналитики только частично находят реализацию в системе, в частности в разделах:

- предиктивного анализа (благодаря прогнозу последнего положительного развития неисправности определена рекомендация приоритетного планирования устранения конкретных неисправностей пути (плановая область));
- прогнозирования бокового износа рельсов (плановая область);
- определения состояния рельсовых плетей бесстыкового пути в виде комплексного коэффициента работает эффективно и затрагивает все три области – конструктивную, оперативную и плановую.

Но для получения высокой достоверности работы предиктивного анализа требуется обязательно учитывать факторы, которые оказывают влияние на развитие неисправностей пути, а также, где неисправности объединены в три стадии формализации: неисправности в плане (Уш, Суж, Р); неисправности в профиле пути (Пр, П, У); дефектность рельсового хозяйства.

Данные формализации разнесены по факторам связанного воздействия: силового воздействия; конструктивный фактор; эксплуатации; внешнего влияния; косвенный фактор [8, 17–22].

Фактор силового воздействия определяет причины, оказывающие динамическое воздействие на развитие неисправности железнодорожного пути подвижным составом.

Конструктивный фактор определяет причину влияния текущей конструкции пути, в том числе геометрических параметров рельсовой колеи, на развитие рассматриваемой неисправности (влияние возвышения упорной рельсовой нити пути на деградационный процесс развития неисправностей) [11, 17].

Фактор эксплуатации характеризует влияние характеристик подвижного состава и режимов его движения на динамику развития неисправности пути [3, 8, 21] (примером может быть не реализация установленных скоростей движения поездов, а также повышение осевых нагрузок).

Фактор внешнего воздействия определяет влияние на рост амплитуды неисправности метрофизических процессов, сезонности и барьерных мест.

Косвенный фактор формализует зависимость развития неисправности пути от косвен-

ных причин (например, как влияют дефекты в профиле пути на неисправность в плане и другие варианты).

Рассмотрим подробнее факторы, влияющие на деградационный процесс состояния пути (табл. 3).

Таблица 3. Факторы, влияющие на деградацию состояния пути в трех формализациях
Table 3. Factors affecting the degradation of the track condition in three formalizations

Фактор Factor	Неисправности в плане пути (Уш, Суж, Р) Defects in the route plan	Неисправности в профиле пути (П, Пр, У) Faults in the track profile	Дефектность рельсового хозяйства Defectiveness of the rail facilities
Силовое воздействие Forceful impact	Дефектность и износ элементов рельсовых креплений. Износ резиновых амортизационных прокладок. Негодность шпал. Боковой износ рельсов. Температурное состояние бесстыкового пути. Состояние балластной призмы и полноты шпальных ящиков Defectiveness and wear of rail fastening elements. Wear of rubber shock absorber pads. The sleepers are unusable. Lateral wear of rails. Temperature state of continuous welded rails. Condition of the ballast prism and fullness of sleeper boxes	Состояние рельсовых стыков. Состояние балластного слоя (уровень загрязнения). Наличие дефектностей рельсов, повышающих ударное воздействие. Повышенное давление на упорную или нижнюю рельсовую нить пути Condition of rail joints. Ballast layer condition (pollution level). The presence of defects in the rails that increase the impact force. Increased pressure on the thrust or bottom rail of the track	Ненормативное содержание рельсовых стыков. Содержание подуклонки рельсов. Несвоевременная шлифовка и обточка накатов металлических элементов стрелочных переводов. Сварные стыки низкого качества. Лubrфикация рельсов. Факторы эксплуатации Non-standard maintenance of rail joints. Rail inclination maintenance. Untimely grinding and turning of the knurling of metal elements of turnouts. Welded joints are of poor quality. Lubrication of rails. Operating factors
Конструктивный Constructive	Норма зашивки ширины рельсовой колеи. Возвышение упорной рельсовой нити пути. Эпюра шпал. Тип шпал. Ширина плеча балластной призмы. Толщина балластного слоя Standard for covering the track gauge width. Elevation of the stop rail track. Diagram of sleepers. Type of sleepers. Shoulder width of the ballast prism. Ballast layer thickness	Несоответствие возвышения упорной нити кривого участка пути реализуемым скоростям грузовых поездов Discrepancy between the elevation of the stop thread of a curved section of track and the speeds of freight trains	Норма зашивки ширины рельсовой колеи. Возвышение упорной рельсовой нити пути. Подуклонка рельсов Standard for covering the track gauge width. Elevation of the stop rail track. Rail inclination

Фактор Factor	Неисправности в плане пути (Уш, Суж, Р) Defects in the route plan	Неисправности в профиле пути (П, Пр, У) Faults in the track profile	Дефектность рельсового хозяйства Defectiveness of the rail facilities
Эксплуатации Exploitation	Участки торможения. Нереализация установленных скоростей. Непогашенное ускорение. Повышение осевой нагрузки. Рекуперативное торможение Braking areas. Failure to achieve established speeds. Unquenched acceleration. Increased axle load. Regenerative braking	Нереализация установленных скоростей. Непогашенное ускорение. Повышение осевой нагрузки Failure to achieve established speeds. Unquenched acceleration. Increasing axle load	Нереализация установленных скоростей. Непогашенное ускорение. Повышение осевой нагрузки. Боксование. Экстренное торможение Failure to achieve established speeds. Unquenched acceleration. Increased axle load. Boxing. Emergency braking
Внешнего влияния External influence	Сезонность. Метеофизические процессы. Барьерные места. Предупреждение с ограничением скорости Seasonality. Meteophysical processes. Barrier places. Speed limit warning	Сезонность. Метеофизические процессы. Наличие заводей или болот вблизи железнодорожных путей Seasonality. Meteophysical processes. The presence of backwaters or swamps near railway tracks	Наличие налипшего песка и другого загрязнения на лубрикатор в кривых участках пути. Наличие дефектов обода колеса подвижного состава. Низкие температуры. Состояние балластной призмы на разрыв The presence of sand and other contaminants adhering to the lubricant in curved sections of the track. Presence of defects in the rim of a rolling stock wheel. Low temperatures. Ballast prism tensile strength
Косвенный Indirect	Неисправности в профиле кривых участков пути. Состояние рельсовых стыков. Лубрикация рельсов. Подуклонка рельсов в кривых малого радиуса более 1/60 Defects in the profile of curved track sections. Condition of rail joints. Lubrication of rails. Rail inclination in small radius curves more than 1/60	Наличие и состояние дренажных и водоотводных искусственных сооружений The presence and condition of drainage and water drainage artificial structures	Уширение рельсовой колеи. Наличие шпалы под стыком. Просадка в зоне стыка Widening of the track gauge. The presence of a sleeper under the joint. Subsidence in the joint area

Выводы

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

1. На данный момент не создано объективной системы предиктивной аналитики элементов ВСП, в том числе в современных средствах диагностики и ЕК АСУИ СДМИ.

2. В методике системы не оценивается полный спектр воздействия на пути некоторых факторов: не учитываются фазы развития неисправности.

3. Нет учета сезонности и других важных моментов, без которых не получится добиться существенного результата в диагностике фак-

тического и перспективного состояния железнодорожной инфраструктуры.

Кроме того, для получения максимально точной информации о состоянии железнодорожного пути необходимо развивать методику предиктивного анализа для определения не только прогнозируемых ситуаций при учете внешнего воздействия, фактической конструкции пути, режимов эксплуатации, но и реально-го текущего состояния пути.

Предложенные факторы и области предиктивного анализа являются основой в реализации наиболее совершенной методики точного определения состояния пути, позволяющей перейти на первую ступень обслуживания инфраструктуры по фактическому состоянию.

Дальнейшим развитием предиктивной аналитики должна стать система логических решений определения не только самой неисправности, но и причины ее возникновения, где важными акцентами данной тематики является процесс расчета и оценки сочетаний состояния связанных конструктивных элементов путевой инфраструктуры, а также ее содержание и обслуживание с целью максимального снижения силового воздействия подвижного состава на ВСП, в частности уменьшение угла набегания колеса на рельс, применение новых подходов в лубрикации рельсов [6, 10, 23], оптимизация нормы зашивки ширины рельсовой колеи и возвышения упорной нити под реализуемые условия эксплуатации, подбор оптимальных параметров подуклонки

рельсов для уменьшения контактных напряжений в системе «колесо – рельс» и другие варианты увеличения ресурса железнодорожного пути в условиях системного нарастания грузопотока и увеличения осевых нагрузок.

Заключение

Существующие методики определения предиктивных состояний путевой инфраструктуры, в том числе реализованные в ЕК АСУИ СДМИ, несовершенны. Применение математического прогноза, ограниченного обработкой ретроспективных данных состояния каждой неисправности, не позволит сформировать объективный результат фактического состояния пути. В основе предиктивного анализа должна быть заложена логическая физико-математическая модель, разделенная на области, фазы развития неисправностей, где основой анализа является многофакторная система определения точного состояния пути, учитывающая условия эксплуатации, контактные напряжения, расчетные интенсивности износа путевой инфраструктуры в комплексе.

Работа над усовершенствованием методики предиктивного анализа является актуальной темой настоящего времени. Исследовательская деятельность будет продолжена в системе многофакторного прогнозирования и влияния конструктивных параметров пути на характер деградационного процесса путевой инфраструктуры [13, 15, 16].

Список литературы

1. Восточный полигон – Трансиб и БАМ. Итоги развития в 2013–2024 гг. // ОАО «РЖД»: сайт. URL : <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19721> (дата обращения 11.06.2025).
2. Тарабрин В.Ф., Юрченко Е.В., Лохач А.В. ЕК АСУИ СДМИ – цифровая платформа для предиктивного анализа и управления состоянием железнодорожной инфраструктуры // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 6. С. 25–28.
3. Бурнаев Е.В. Алгоритмические основы предиктивной аналитики в задачах индустриального проектирования // Информационные процессы. 2019. Т. 19. № 3. С. 271–283.
4. Тарасов Е.М., Бредун И.С. Влияние предиктивной аналитики на восстанавливаемость систем // Наука и образование транспорту. 2023. № 1. С. 243–245.
5. Айдульдинов Д.М. Планирование ремонта с применением предиктивной аналитики // Научный потенциал-2023 : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. Петрозаводск, 2023. С. 164–168.
6. Певзнер В.О., Белоцветова О.Ю., Потапов А.В. Результаты наблюдений по оценке влияния эксплуатационных факторов на боковой износ рельсов // Вестн. науч.-исследоват. ин-та ж.-д. трансп. 2016. Т. 75. № 4. С. 242–247.
7. Параметры колеи и износ рельсов в кривых / Н.И. Карпушенко, А.П. Козлов, И.А. Котова и др. // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 11. С. 7–9.
8. Исследование напряжений в контакте колесо – рельс // Железные дороги мира. 2011. № 1. С. 54–58.
9. Взаимодействие колес и рельсов в кривых участках / Н.И. Карпушенко, И.А. Котова, Ю.Н. Ликратов и др. // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 6. С. 2–5.
10. Краснов О.Г., Акашев М.Г., Никонова Н.М. Влияние лубрикации на силовую нагруженность внутреннего рельса // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 1. С. 6–9.
11. Цихалевский И.С., Нафиков Г.-А.М., Стаценко К.А. Вписывание тележки подвижного состава в кривую. Екатеринбург : УрГУПС, 2017. 47 с.

12. Поздняков А.С. Применение метода Хольта-Винтерса при анализе и прогнозировании динамики временных рядов // Проблемы организации и управления на транспорте : материалы межвуз. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2016. Вып. 11 (230). С. 57–64.
13. Бурнаев Е.В. Модели, методы и алгоритмы предиктивной аналитики на многообразиях данных : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2021. 498 с.
14. Ларченко Ю.Г., Котляров В.П. Построение уравнения предиктивной аналитики производительности труда промышленного предприятия // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2022. № 7 (63). С. 69–76.
15. Тимофеев Е.Н., Севостьянов А.А. Перспективы цифровой трансформации путевого хозяйства // Наука и молодежь XXI века : материалы регионал. форума. Новосибирск, 2022. Ч. 1. С. 143–147.
16. Ведение рельсового хозяйства на основе предиктивных методов / В.М. Ермаков, С.А. Васильева, О.А. Янович и др. // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 12. С. 2–7.
17. Ивашов В.А., Орлов М.В., Сирина Н.Ф. Расчет и выбор норм проектирования, ремонта и технического обслуживания тележек грузовых вагонов из условия уменьшения интенсивности износа гребней колес. Екатеринбург : УрГАПС, 1997. 19 с.
18. Оптимизация взаимодействия в системе «колесо – рельс» / С.А. Виноградов, А.В. Сухов, А.А. Лунин и др. // Железнодорожный транспорт. 2023. № 3. С. 37–45.
19. Чечельницкий И.А. Оптимизация жизненного цикла системы «колесо – рельс» // Бюллетень результатов научных исследований. 2020. № 3. С. 99–108.
20. Марков Д.П. Трибология железнодорожной тележки // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2018. Т. 77. № 4. С. 230–240.
21. Севостьянова Л.Л. Устройство, проектирование и расчеты рельсовой колеи. Ч. 1. Хабаровск : ДВГУПС, 2007. 47 с.
22. Ромен Ю.С. Факторы, обуславливающие процессы взаимодействия в системе колесо – рельс при движении поездов в кривых // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2015. № 1. С. 17–26.
23. Царёв Н.С. Прогнозирование износа железнодорожного рельса // Вестник транспорта Поволжья. 2024. № 3 (105). С. 91–101.

References

1. Vostochnyi poligon – Transsib i BAM. Itogi razvitiya v 2013–2024 gg. (elektronnyi resurs) [The eastern polygon is Transsib and Baikal-Amur Railway. Development results in 2013-2024 (electronic resource)]. Available at: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19721> (Accessed June 11, 2025).
2. Tarabrin V.F., Yurchenko E.V., Lokhach A.V. EK ASUI SDMI — tsifrovaya platforma dlya prediktivnogo analiza i upravleniya sostoyaniem zheleznodorozhnoi infrastruktury [Integrated diagnostics and Monitoring System of railway infrastructure as part of a Unified corporate automated Infrastructure Management System is a digital platform for predictive analysis and management of the state of railway infrastructure]. Put' i putevye khozyaistvo [Track and track facilities], 2022, no 6, pp. 25–28.
3. Burnaev E.V. Algoritmicheskie osnovy prediktivnoi analitiki v zadachakh industrial'nogo proektirovaniya [Algorithmic foundations of predictive analytics in industrial design tasks]. *Informatsionnye protsessy* [Information processes], 2019, Vol. 19, no 3, pp. 271–283.
4. Tarasov E.M., Bredun I.S. Vliyanie prediktivnoi analitiki na vosstanavlivaemost' sistem [The influence of predictive analytics on the recoverability of systems]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and Education for Transport], 2023, no 1, pp. 243–245.
5. Aidul'dinov D.M. Planirovanie remonta s primeneniem prediktivnoi analitiki [Planning repairs using predictive analytics]. *Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnyi potentsial-2023»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Scientific potential-2023»]. Petrozavodsk, 2023, pp. 164–168.
6. Pevzner V.O., Belotsvetova O.Yu., Potapov A.V. Rezul'taty nablyudeni po otsenke vliyaniya ekspluatatsionnykh faktorov na bokovoi iznos rel'sov [The results of observations on the assessment of the influence of operational factors on lateral wear of rails]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport], 2016, Vol. 75, no 4, pp. 242–247.
7. Karpushchenko N.I., Kozlov A.P., Kotova I.A., Antereikin E.S. Parametry kolei i iznos rel'sov v krivykh [Gauge parameters and rail wear in curves]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2007, no 11, pp. 7–9.
8. Issledovanie napryazhenii v kontakte koleso – rel's [Investigation of stresses in wheel – rail contact]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world], 2011, no 1, pp. 54–58.
9. Karpushchenko N.I., Kotova I.A., Likratov Yu.N., Surovin P.G., Antereikin E.S. Vzaimodeistvie koles i rel'sov v krivykh uchastkakh [Interaction of wheels and rails in curved sections]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2008, no 6, pp. 2–5.
10. Krasnov O.G., Akashev M.G., Nikonova N.M. Vliyanie lubrikatsii na silovuyu nagruzhennost' vnutrennego rel'sa [The influence of lubrication on the power load of the inner rail]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2024, no 1, pp. 6–9.
11. Tsikhalevskii I.S., Nafikov G.-A.M., Statsenko K.A. Vpisyvanie telezhki podvizhnogo sostava v krivuyu [Fitting a rolling stock trolley into a curve]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2017. 47 p.
12. Pozdnyakov A.S. Primenenie metoda Khol'ta-Vintersa pri analize i prognozirovanii dinamiki vremennykh ryadov [Application of the Holt-Winters method in the analysis and forecasting of time series dynamics]. *Materialy mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy organizatsii i upravleniya na transporte»* [Proceedings of the interuniversity scientific and practical conference «Problems of organization and management in transport»]. Ekaterinburg, 2016, iss. 11 (230), pp. 57–64.
13. Burnaev E.V. Modeli, metody i algoritmy prediktivnoi analitiki na mnogoobraziyakh dannykh [Models, methods and algorithms of predictive analytics on data manifolds]. Doctor's theses. Moscow, 2021. 498 p.

14. Larchenko Yu.G., Kotlyarov V.P. Postroenie uravneniya prediktivnoi analitiki proizvoditel'nosti truda promyshlennogo predpriyatiya [Construction of the equation of predictive analytics of labor productivity of an industrial enterprise]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University], 2022, no 7 (63), pp. 69–76.
15. Timofeev E.N., Sevost'yanov A.A. Perspektivy tsifrovoy transformatsii putevogo khozyaistva [Prospects for digital transformation of the track economy]. *Materialy regional'nogo foruma «Nauka i molodezh' XXI veka»* [Materials of the regional forum «Science and youth of the XXI century»]. Novosibirsk, 2022, part 1, pp. 143–147.
16. Ermakov V.M., Vasil'eva S.A., Yanovich O.A., Egorov M.A. Vedenie rel'sovogo khozyaistva na osnove prediktivnykh metodov [Maintaining a track facilities based on predictive methods]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2022, no 12, pp. 2–7.
17. Ivashov V.A., Orlov M.V., Sirina N.F. Raschet i vybor norm proektirovaniya, remonta i tekhnicheskogo obsluzhivaniya telezhek gruzovykh vagonov iz usloviya umen'sheniya intensivnosti iznosa grebnei koles [Calculation and selection of standards for the design, repair and maintenance of trolleys of freight wagons based on the condition of reducing the wear rate of wheel ridges]. Ekaterinburg: UrGAPS Publ., 1997. 19 p.
18. Vinogradov S.A., Sukhov A.V., Lunin A.A., Suslov O.A., Nazarov I.V., Zagranichnik K.L. Optimizatsiya vzaimodeistviya v sisteme «koleso – rel's» [Optimization of interaction in the «wheel – rail» system]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no 3, pp. 37–45.
19. Chechel'nitskii I.A. Optimizatsiya zhiznennogo tsikla sistemy «koleso – rel's» [Optimization of the life cycle of the wheel–rail system]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2020, no 3, pp. 99–108.
20. Markov D.P. Tribologiya zheleznodorozhnoi telezhki [Tribology of a railway trolley]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport], 2018, Vol. 77, no 4, pp. 230–240.
21. Sevost'yanova L.L. Ustroistvo, proektirovanie i raschety rel'sovoi kolei. Ch. 1 [Device, design and calculations of the rail track. Part 1]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2007. 47 p.
22. Romen Yu.S. Faktory, obuslavlivayushchie protsessy vzaimodeistviya v sisteme koleso – rel's pri dvizhenii poezda v krivykh [Factors determining the processes of interaction in the wheel–rail system when a train is moving in curves]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport], 2015, no 1, pp. 17–26.
23. Tsarev N.S. Prognozirovanie iznosa zheleznodorozhnogo rel'sa [Forecasting of railway rail wear]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region], 2024, no 3 (105), pp. 91–101.

Информация об авторах

Асалханова Татьяна Николаевна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: asalk-tatyana@yandex.ru.

Осколков Андрей Александрович, аспирант кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: di_oskolkovaa@esrr.ru.

Information about the authors

Tat'yana N. Asalkhanova, Ph.D. in Economic Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: asalk-tatyana@yandex.ru.

Andrei A. Oskolkov, Ph.D. Student of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: di_oskolkovaa@esrr.ru.

Моделирование работы локомотивного комплекса станции стыкования разных систем тока с учетом прироста пропускной и перерабатывающей мощностей для пропуска перспективного поездопотока на инфраструктуре Восточного полигона железных дорог

В.А. Оленцевич✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉olencevich_va@mail.ru

Резюме

Дефицит тягового подвижного состава в грузовом движении оказывает серьезное негативное влияние на возможности реализации плановых объемов перевозок Восточного полигона железных дорог. Проблемы связаны в том числе и с длительным простоем локомотивов в ремонте. Вопросы нарушения сроков пребывания техники на локомотивном комплексе ОАО «Российские железные дороги» являются актуальными и требуют применения научных подходов для обоснования целесообразности использования методов модернизации и расширения производственных мощностей с целью повышения качества обслуживания и ремонта тягового подвижного состава в условиях колебания грузопотока. В связи с данными факторами в научной статье представлены некоторые результаты анализа существующих размеров движения и проведено моделирование работы локомотивного комплекса станции стыкования разных систем тока с учетом реализации прогнозных значений пропускной и провозной мощностей по инфраструктурному комплексу Восточного полигона железных дорог. Сравнение нормативных и фактических затрат времени оборота локомотивов для выполнения технического обслуживания по родам тока позволило выявить превышение фактических значений простоя по всем технологическим линиям работы локомотивного комплекса. Осуществлен расчет загрузки путей на пунктах технического осмотра локомотивов и выставочных путей железнодорожной станции. Моделирование работы локомотивного комплекса постоянного и переменного тока при существующих и перспективных параметрах поездопотоков проведено за счет построения вариантов суточных планов-графиков функционирования железнодорожной станции. В качестве основных показателей, используемых для расчета технико-экономической эффективности представленного инвестиционного проекта, были взяты: чистый дисконтированный доход, индекс доходности дисконтированных инвестиций, срок окупаемости с учетом дисконтирования.

Ключевые слова

Восточный полигон железных дорог, перспективные размеры движения, тяговый подвижной состав, грузооборот, пропускная и перерабатывающая мощности, моделирование работы локомотивного комплекса, железнодорожная станция стыкования разных систем тока, загрузка инфраструктурного комплекса, чистый дисконтированный доход

Для цитирования

Оленцевич В.А. Моделирование работы локомотивного комплекса станции стыкования разных систем тока с учетом прироста пропускной и перерабатывающей мощностей для пропуска перспективного поездопотока на инфраструктуре Восточного полигона железных дорог / В.А. Оленцевич // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 100–118. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).100-118.

Информация о статье

поступила в редакцию: 19.06.2025 г.; поступила после рецензирования: 24.06.2025 г.; принята к публикации: 25.06.2025 г.

Modeling the operation of the locomotive complex of the docking station of different current systems, taking into account the increase in throughput and processing capacities for the passage of prospective train traffic on the Eastern Railway polygon infrastructure

V.A. Olentsevich✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉olencevich_va@mail.ru

Abstract

The shortage of traction rolling stock in freight traffic has a serious negative impact on the ability to meet the planned volumes of traffic in the Eastern Railway polygon. The problems are related, among other things, to the long downtime of locomotives during repairs. The issues of exceeding the time limits for the maintenance of locomotives at the locomotive complex of Russian Railways are relevant and require the use of scientific approaches to justify the feasibility of modernizing and expanding produc-

tion capacities in order to improve the quality of maintenance and repair of traction rolling stock in the face of fluctuating cargo traffic. In connection with these factors, the scientific article presents some results of the analysis of the existing traffic volumes and the modeling of the operation of the locomotive complex at the junction station of different current systems, taking into account the implementation of the forecast values of the throughput and carriage capacities of the infrastructure complex of the Eastern railway polygon. A comparison of the standard and actual turnover times of locomotives for performing maintenance by type of current was conducted, which allowed for the identification of excess actual downtime values for all technological lines of the locomotive complex. The loading of tracks at locomotive inspection points and exhibition tracks of the railway station was calculated. The operation of the locomotive complex of direct and alternating current was modeled based on the construction of variants of daily work schedules for the railway station, taking into account the existing and future parameters of train traffic. The main indicators used to calculate the technical and economic efficiency of the presented investment project were the net discounted income, the return on discounted investment, and the discounted payback period.

Keywords

Eastern railway polygon, prospective traffic sizes, traction rolling stock, cargo turnover, throughput and processing capacities, simulation of the locomotive complex, railway station for connecting different current systems, loading of the infrastructure complex, net discounted income

For citation

Olentsevich V.A. Modelirovanie raboty lokomotivnogo kompleksa stantsii stykovaniya raznykh sistem toka s uchetom prirosta propusknoi i pererabatyvayushchei moshchnosti dlya propuska perspektivnogo poezdopotoka na infrastrukture Vostochnogo poligona zheleznnykh dorog [Simulation of the operation of the locomotive complex of the docking station of different current systems, taking into account the increase in throughput and processing capacities for the passage of promising train traffic on the infrastructure of the Eastern Railway polygon]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 100–118. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).100-118.

Article Info

Received: June 19, 2025; Revised: June 24, 2025; Accepted: June 25, 2025.

Введение

По итогам первого полугодия 2025 г. грузооборот на Восточном полигоне вырос на 2,6 % по сравнению с аналогичным периодом прошлого года и составил порядка 2,6 млн т·км в сутки. Этому способствовало увеличение количества поездов, пропущенных в режиме виртуальной сцепки, на 20,6 % (до 43,3 тыс.), тяжёловесных – на 15,2 % (до 18,6 тыс.), а также соединённых – на 27,9 % (до 5 тыс.). Но есть и негативные факторы. Ограничением для дальнейшего роста объёмов грузоперевозок служит нехватка тягового ресурса на сети железных дорог полигона, что из локальной проблемы стало одной из главных тем обсуждения руководства ОАО «РЖД».

Согласно данным экспертов суммарно за 2024 г. холдинг имел потери объёма грузоперевозок по причине низкого качества обеспечения перевозочного процесса тяговыми ресурсами около 50 млн т. Прогноз потерь на 2025 г. – 52 млн т. Результаты оценки специалистами ОАО «РЖД» потребности в тяговом подвижном составе для реализации прогнозных значений грузопотока с 2025 до 2035 г. выявили необходимость закупки 8,2 тыс. ед. или 680 локомотивов в год [1–3].

В соответствии с установленным планом развития отрасли, холдинг планирует до 2035 г. закупить почти 10 тыс. локомотивов. Именно данный объём позволит компенсировать текущее выбытие единиц техники и создать достаточный парк для железнодорожных перевозок с учетом планируемого роста грузооборота. При формировании базовых значений помодельного плана закупок в отдельные годы для реализации конкретных потребностей определенных полигонов и эксплуатационных локомотивных депо рассматривается как серийный тяговый подвижной состав, так и инновационные серии электровозов и тепловозов различных типов, разработанные для успешной реализации специализированных задач и особых условий эксплуатации. Инновационные локомотивы учитывают принципиально новые требования к работе и должны обладать эффектами, связанными с более экономичной эксплуатацией и ремонтом, высокой надежностью, оптимальной производительностью, обеспечивать беспрепятственное вождение поездов большой массы и длинносоставности, быть простыми и удобными в эксплуатации и обслуживании. Сегодня локомотивы «старых» серий рассредоточены по всему инфраструктурному комплексу железнодорожной транспортной системы, а акцент на

закупку новых планируется в большей степени для нужд предприятий Восточного полигона железных дорог [1–4].

Оценки экспертов показали, что потребность в тяговом подвижном составе различных мощностей и модификаций к 2035 г. достигнет почти 10 тыс. ед. При этом прогнозируется дефицит в 1,5 тыс. ед. данной техники к 2030 г. [1–5].

Не позволяют стабилизировать ситуацию с движением грузовых поездов в соответствии с расписанием нерешенные вопросы по обеспечению заданного уровня надежности, качеству ремонта и своевременной выдачи поездных локомотивов под график движения поездов [5–9].

Объектом исследования является локомотивный комплекс железнодорожной станции Восточного полигона, предметом исследования – схема, технология работы и перерабатывающая способность локомотивного комплекса станции.

Цель научного исследования, представленного в данной статье, заключается в технической и экономической оценке реконструктивных мероприятий на инфраструктуре объекта исследования путем проведения моделирования технологии работы локомотивного комплекса станции стыкования разных систем тока в условиях колебания пропускной и провозной мощностей для пропуска перспективного поездопотока.

Проблемы эффективной работы локомотивного комплекса Восточного полигона железных дорог

Проведенный анализ расчетных показателей позволил сделать вывод, что для бесперебойной реализации фактического объема грузооборота имеющегося количества тягового подвижного состава достаточно. Какого-либо дефицита не наблюдается. При этом по факту производства эксплуатационной работы по некоторым направлениям движения он присутствует и составляет значительную величину. Данная тенденция связана с тем, что часть локомотивов направляется для производства ремонта гораздо раньше установленных нормативных сроков. Также есть определенные проблемы с обеспечением потребностей локомотивов бригадами [1, 5–9].

В результате схождения ряда технических и организационных факторов на некоторых дорогах, входящих в состав Восточного полигона, сегодня наблюдается дефицит локомотивной тяги, не обеспечиваются заданные параметры графиков движения поездов.

Ключевые параметры обеспечения потребности локомотивов, в том числе электропоездов и тепловозов, а также локомотивных бригад для реализации грузопотока 2025 г. в объеме 166 млн т представлены на рис. 1–3 [1, 3, 4, 8].

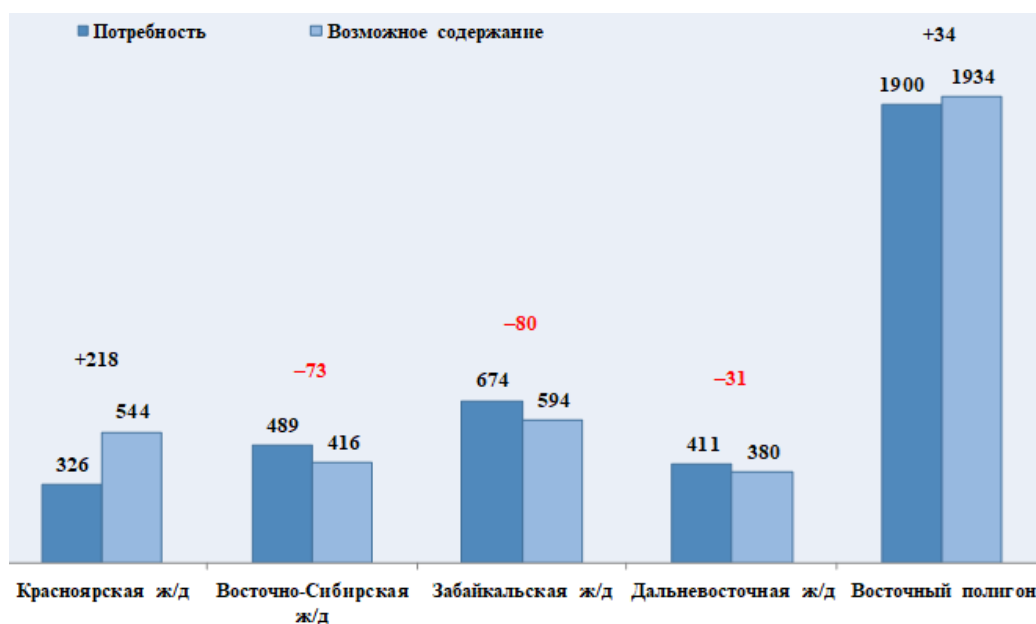


Рис. 1. Потребность электропоездов эксплуатируемого парка
Fig. 1. Demand for electric locomotives in the operating fleet

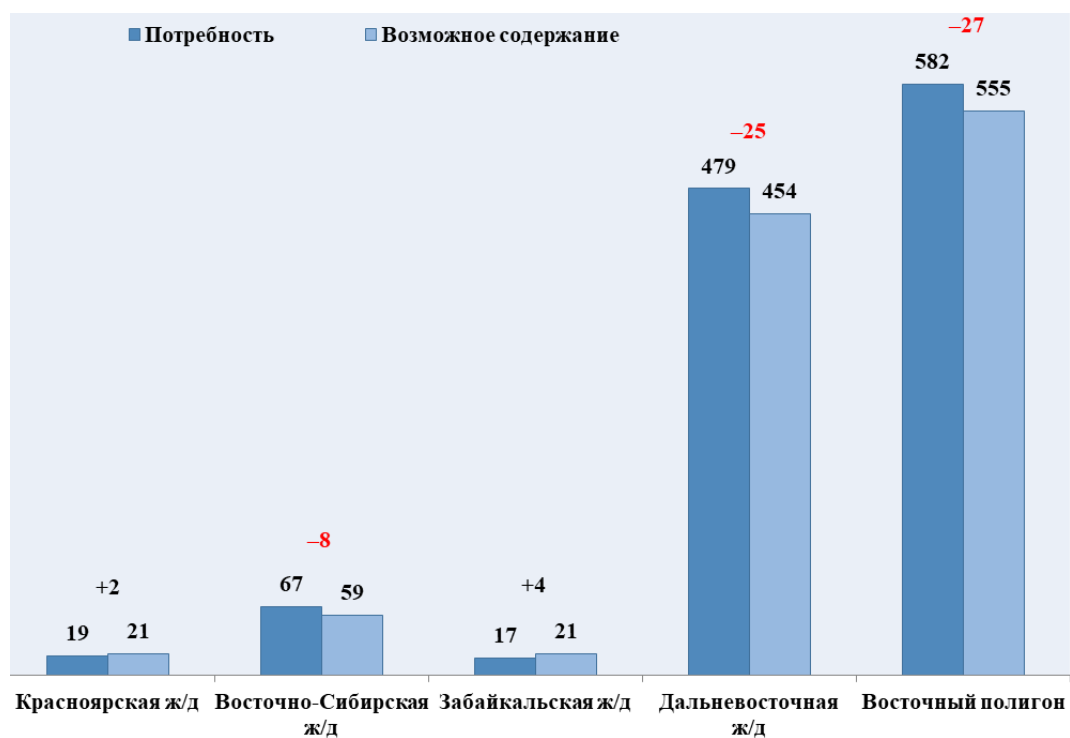


Рис. 2. Потребность тепловозов эксплуатируемого парка
Fig. 2. Demand for diesel locomotives in the operating fleet

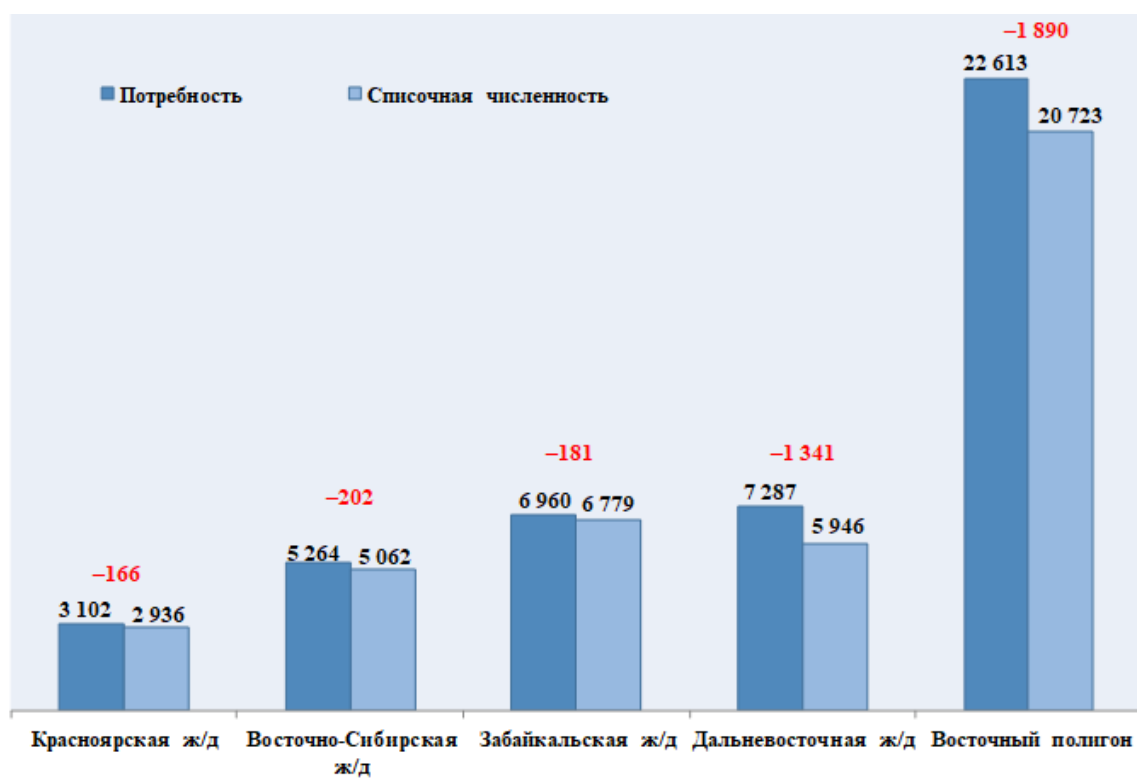


Рис. 3. Укомплектование локомотивными бригадами
Fig. 3. Staffing of locomotive crews

В результате проведенного исследования ключевых параметров обеспечения потребности локомотивов и локомотивных бригад для реализации установленной величины грузопотока 2025 г. на Восточном полигоне железных дорог выявлен ряд проблем в работе локомотивного комплекса.

1. Износ и старение рабочего парка тягового подвижного состава. Согласно технологии работы железнодорожной транспортной системы, значительная доля локомотивов эксплуатируется длительное время, что приводит к их естественному физическому и моральному износу. Многие единицы тягового подвижного состава устарели технологически и не соответствуют современным требованиям по обеспечению уровня энергоэффективности, экологичности и производительности.

2. Недостаточное обновление парка. Российские производители не всегда успевают удовлетворить потребности ОАО «РЖД» в новых локомотивах. Закупка новых машин требует значительных инвестиций, которые могут быть ограничены бюджетом компании. Если российский рынок не будет закрываться в части локомотивостроительных заводов, то вполне возможно появление новых игроков из-за рубежа. Это, конечно же, в первую очередь Китай.

3. Проблемы с ремонтом и обслуживанием. Ремонтные депо перегружены, что приводит к увеличению времени простоя локомотивов. Дефицит запчастей, особенно для устаревших моделей, может увеличивать время нахождения в ремонте.

4. Организационные и управленческие проблемы. Локомотивы используются не рационально, например, из-за неправильного планирования поездной работы или из-за иных факторов, вызывающих сбои в движении поездов.

5. Внешние факторы. В условиях санкционной политики возникают трудности с поставкой импортных комплектующих или технологий, а также запасных частей и некоторого оборудования.

6. Человеческий фактор. Дефицит квалифицированного персонала, обладающего необходимыми профессиональными навыками, негативно отражается на существующих процессах ремонта локомотивов.

7. Экономические факторы. Рост цен на энергоносители, материалы и комплектующие

ограничивает возможности для ремонта и модернизации существующего парка [3, 7–10].

Таким образом, проведенные исследования показали, что одним из сдерживающих факторов развития Восточного полигона железных дорог, основной задачей которого до 2030 г. является увеличение пропускной и провозной мощностей, является наличие ограничений в работе локомотивных комплексов железнодорожных станций стыкования разных систем тока [3, 9–12]. В связи с перечисленными факторами проведен анализ работы одного наиболее крупного из них, расположенного на железнодорожной станции *М*.

Анализ работы локомотивного комплекса железнодорожной станции стыкования разных систем тока

Наиболее значимой на данном направлении движения является железнодорожная станция *М*, расположенная на границе участков *Т – М* и *М – А-1* Восточного полигона и обеспечивающая бесперебойную работу двух его наиболее грузонапряженных железных дорог *К* и *3-С*.

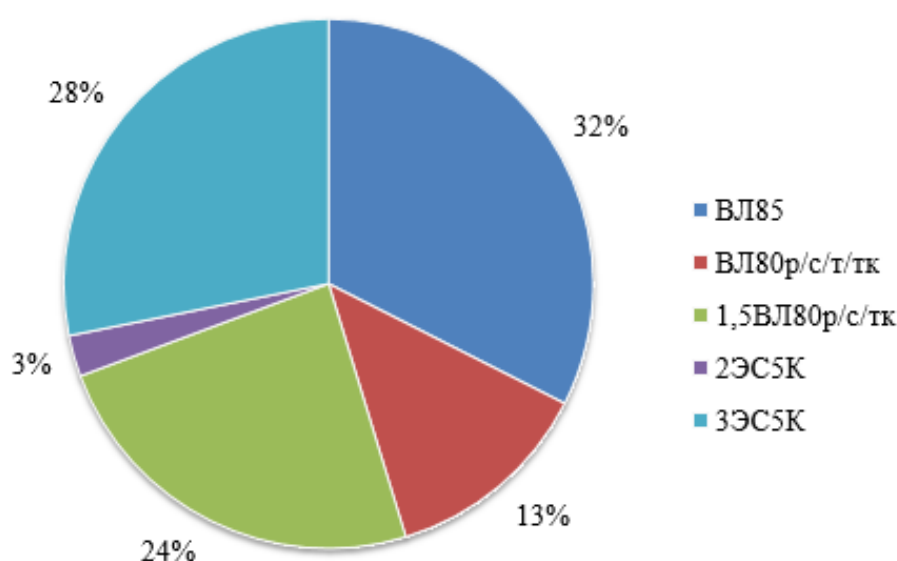
Роль станции заключается в обеспечении беспрепятственного пропуска транзитного поездопотока между *К* и *3-С* железными дорогами. Станция обслуживает локомотивный комплекс стыкования разных систем тока, смена локомотивов производится у всех поездов. Локомотивный комплекс станции обслуживает следующие тяговые плечи: *М – К*, протяженность 2 581 км; *М – И – С*, протяженность 1 464 км; *М – Т*, протяженность 805 км. Выполняет техническое обслуживание в объеме ТО-2 для локомотивов постоянного и переменного тока. Установленная мощность сервисного участка (согласно паспортным характеристикам) при равномерном подходе локомотивов для производства ТО-2 на локомотивный комплекс станции представлена в табл. 1 [1, 13–17].

Максимально железнодорожная станция пропускает до 80 пар поездов в сутки, в том числе 12 пар пассажирских поездов и 64 пары грузовых [1].

На основе размеров выполнения программы ремонта грузовых локомотивов по циклу ТО-2 в 2024 г. можно определить их процентное соотношение в среднем в год (рис. 4) [1, 7, 9].

Таблица 1. Мощность сервисного участка при равномерном подходе локомотивов**Table 1.** Service section capacity with uniform approach of locomotives

Серия локомотивов Series of locomotives	Количество ремонтных позиций Number of repair positions	Длина ремонтных позиций Length of repair positions	Мощность позиций пункта технического обслуживания локомотивов, ед. в год Capacity of Locomotive Maintenance Facility Positions, units per year	Мощность позиций пункта технического обслуживания локомотивов, ед. в сутки Capacity of Locomotive Maintenance Facility Positions, units per day
ВЛ80 в/и, ВЛ85, ЭС5к в/и	5	240	70 092	71
ВЛ60 в/и, ЭП1 в/и, ТЭМ в/и, ТЭ10 в/и	1	48	5 183	14

**Рис. 4.** Распределение грузовых локомотивов по сериям**Fig. 4.** Distribution of freight locomotives by series

На основе диаграммы (см. рис. 4) можно сделать вывод, что высокая частота поступления в локомотивный комплекс станции *М* у трех серий локомотивов: ВЛ85, 3ЭС5К и 1,5ВЛ80р/с/тк.

Нормативные и среднегодовые фактические затраты времени оборота локомотивов с заходом на пункт технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ) для выполнения операций по техническому обслуживанию в объеме ТО-2 с разбивкой по элементам технологического цикла для локомотивов постоянного и переменного тока представлены в табл. 2 [1, 7, 9].

Исходя из расчетных параметров движения поездов в месяц максимального объема перевозок, на локомотивный комплекс для производства технологических операций поступают:

– с четного перегона *М – А*: 64 грузовых локомотива (52 локомотива серии 2ЭС6, 12 локомотивов серии ВЛ10); 12 пассажирских локомотивов из пассажирского парка – все локомотивы серии ЭП2К; 2 электропоезда серии ЭД4 из пассажирского парка;

– с нечетного перегона *М – П*: 64 грузовых локомотива (20 локомотив серии ВЛ85, 18 локомотивов 3ЭС5К, 16 локомотивов 1,5ВЛ80р/с/тк, 8 локомотивов серии ВЛ80р/с/т/тк, 2 локомотива серии 2ЭС5К); 8 пассажирских локомотивов из пассажирского парка – все локомотивы серии ЭП1.

На основании выполненного анализа норм простоя локомотивов в локомотивном комплексе по элементам произведено сравнение его нормативных значений на каждой технологиче-

ской линии с фактическим значением. Анализ показал превышение фактических значений простоя по всем технологическим линиям работы локомотивного комплекса станции М.

У всех грузовых поездов производится смена поездного локомотива, маршруты смены поездных локомотивов представлены на рис. 5.

Таблица 2. Нормативные и фактические затраты времени оборота локомотивов для выполнения ТО-2

Table 2. Standard and actual turnaround time costs of locomotives for performing TO-2

Затраты времени Cost time	Серия локомотива Series locomotive	Простой под технологическими операциями, ч Downtime for technological operations, h						
		От прибытия до начала операций в контрольном пункте From arrival to commencement of operations at the checkpoint	От начала операций в контрольном пункте до начала ТО-2 From the start of operations at the checkpoint to the start of TO-2	На ТО-2 At TO-2	От ТО-2 до начала операций в контрольном пункте From TO-2 to the beginning operations at the checkpoint	В целом по локомотивному комплексу Generally by locomotive complex	От начала операций в контрольном пункте до отправления From the beginning operations at the checkpoint before departure	Оборот локомотива Turnover locomotive
Нормативные Regulatory	Для локомотивов постоянного тока For DC locomotives							
	ЭП2К	0,3	0,76	0,5	0,65	1,91	0,91	2,82
	ВЛ10, ВЛ10Т/У	0,3	0,76	1,3	0,65	2,71	0,91	3,92
	2ЭС6	0,3	0,61	1	0,65	2,26	0,91	3,47
	Для локомотивов переменного тока For AC locomotives							
	Грузовой Cargo	0,35	0,6	1,5	0,7	2,8	1,16	4,31
	Пассажирский Passenger	0,35	0,6	1,0	0,7	2,3	1,16	3,81
Фактические (среднее за год) Actual (annual average)	Для локомотивов постоянного тока For DC locomotives							
	ЭП2К	0,77	1,07	0,65	1,51	3,22	2,01	6,00
	ВЛ10, ВЛ10Т/У	0,87	1,04	1,33	0,98	3,35	1,01	5,23
	2ЭС6	0,94	1,07	1,08	0,98	3,13	0,97	5,04
	Для локомотивов переменного тока For AC locomotives							
	ЭП1	0,53	1,46	1,34	1,85	4,66	1,33	6,51
	ВЛ85	0,55	1,45	1,36	1,64	4,45	1,28	6,29
	ВЛ80	0,52	1,45	1,32	2,04	4,82	1,36	6,70
	1,5ВЛ80	0,52	1,43	1,30	1,90	4,63	1,36	6,51
	2ЭС5К	0,59	1,51	1,22	2,55	5,29	1,38	7,25
	3ЭС5К	0,69	1,36	1,42	2,38	5,17	1,25	7,10

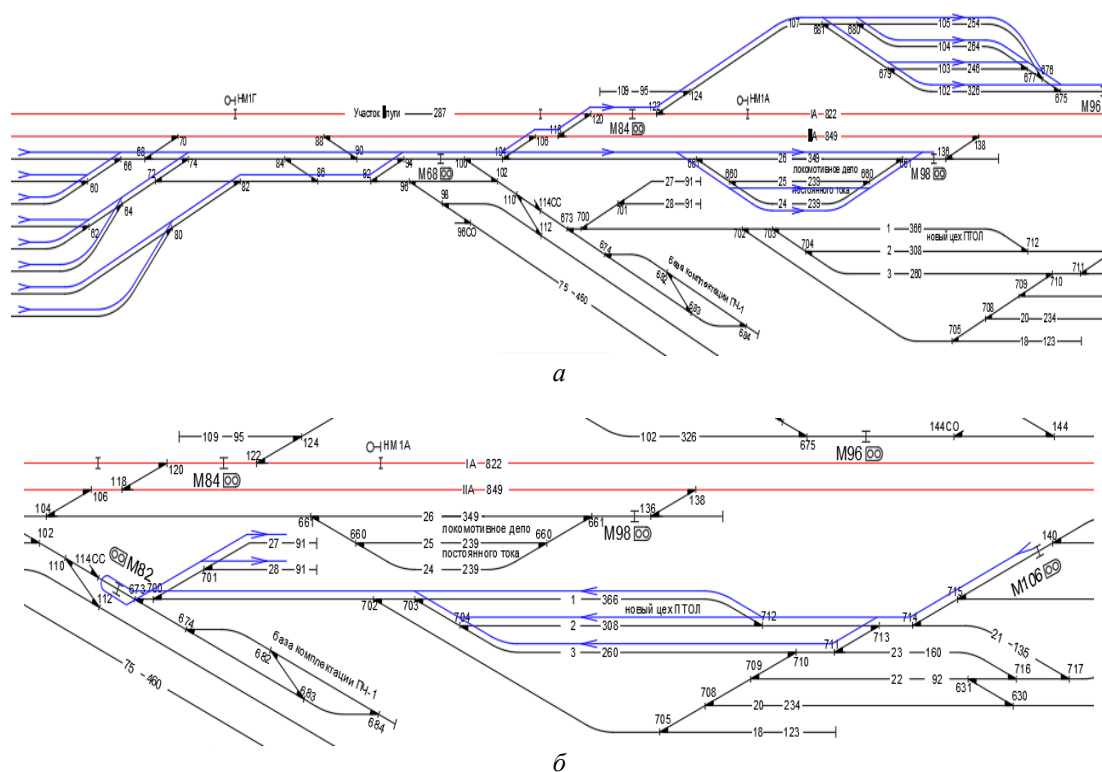


Рис. 5. Схемы продвижения локомотивов:

а – в депо постоянного тока; б – в депо переменного тока

Fig. 5. Locomotive route diagrams:

а – to the DC depot; б – to the AC depot

Моделирование работы локомотивного комплекса постоянного и переменного токов осуществляется на основе времени поступления поездных локомотивов в локомотивный комплекс станции. В ходе моделирования необходимо учитывать затраты времени на следующие операции:

- заезд поездного локомотива в депо;
- сдача локомотива поездной бригадой машинисту прогрева;
- постановка поездного локомотива в депо;
- выполнение ТО-2;
- уборка локомотива из депо, заключительные операции;
- перестановка локомотива на пути отстоя;
- прием готового к отправлению локомотива поездной бригадой и его следование на станцию [1, 18–20].

Моделирование работы локомотивного комплекса постоянного и переменного тока при существующих размерах движения осуществляется в соответствии с суточным планом-графиком работы локомотивного комплекса в целом. На его основе определены показатели,

значение которых представлено в табл. 3 [1, 18].

С целью более точной оценки результатов работы объекта исследования по итогам моделирования необходимо рассчитать следующие показатели работы локомотивного комплекса:

- загрузка путей ПТОЛ;
- загрузка выставочных путей.

Расчет загрузки выполняется для следующих условий функционирования:

- пути ПТОЛ № 1, 2 и 3 имеют вместимость по два локомотива на каждом пути – по количеству смотровых канав;
- перед цехом может размещаться по два трехсекционных локомотива на каждом пути;
- за цехом могут размещаться трехсекционные локомотивы – на пути № 1 и 2 по два, на пути № 3 – один;
- выставочные пути имеют следующую вместимость трехсекционных локомотивов: пути № 21, 27, 28 – два, путь № 22 – пять, путь № 23 – три [1, 18].

Результаты расчета загрузки путей ПТОЛ и выставочных путей представлена в табл. 4.

Таблица 3. Показатели работы локомотивного комплекса

Table 3. Performance indicators of the locomotive complex

Показатель Indicator	Значение, час Value, hour	
	Нормативное Normative	Фактическое Actual
<i>Локомотивный комплекс постоянного тока</i> <i>DC locomotive complex</i>		
Количество локомотивов, поступивших в локомотивный комплекс, в том числе Number of locomotives received by the locomotive complex, including:		
– пассажирские локомотивы passenger locomotives	–	12
– грузовые локомотивы freight locomotives	–	64
Количество локомотивов, прошедших ТО-2, в том числе Number of locomotives that passed TO-2, including:		
– пассажирские локомотивы passenger locomotives	–	5
– грузовые локомотивы freight locomotives	–	5
Среднее время оборота локомотивов, ч Average locomotive turnaround time, h:		
– пассажирские локомотивы серии ЭП2К passenger locomotives of the EP2K series	2,82	4,72
– грузовые локомотивы, в том числе серии freight locomotives, including the following series:		
ВЛ10	3,92	4,51
2ЭС6	3,47	4,39
<i>Локомотивный комплекс переменного тока</i> <i>AC locomotive complex</i>		
Количество локомотивов, поступивших в локомотивный комплекс, в том числе Number of locomotives received by the locomotive complex, including:		
– пассажирские локомотивы passenger locomotives	–	12
– грузовые локомотивы freight locomotives	–	64
Количество локомотивов, прошедших ТО-2, в том числе Number of locomotives that passed TO-2, including:		
– пассажирские локомотивы passenger locomotives	–	7
– грузовые локомотивы freight locomotives	–	35
Среднее время оборота локомотивов, ч Average locomotive turnaround time, h:		
– пассажирские локомотивы серии ЭП1 passenger locomotives of the EP1 series	3,81	5,76
– грузовые локомотивы, в том числе серии freight locomotives, including the following series:		
ВЛ85	4,31	4,84
3ЭС5К	4,31	5,36
1,5ВЛ80	4,31	5,13
ВЛ80	4,31	4,75
2ЭС5К	4,31	4,52

Таблица 4. Загрузка путей на пунктах технического осмотра локомотивов и выставочных путей**Table 4.** Loading tracks at locomotive inspection stations and exhibition tracks

Путь Track	Время занятия, мин Loading time, min	Загрузка, % Loading, %
Путь № 1 (ПТОЛ), при этом Track No 1 (PTOL), in this case: один локомотив на пути one locomotive on the track два локомотива на пути two locomotives on the track	1 157 442 727	80,3 – –
Путь № 2 (ПТОЛ), при этом Track No 2 (PTOL), in this case: один локомотив на пути one locomotive on the track два локомотива на пути two locomotives on the track	1 214 478 736	84,3 – –
Путь № 3 (ПТОЛ), при этом Track No 3 (PTOL), in this case: один локомотив на пути one locomotive on the track два локомотива на пути two locomotives on the track	1 388 746 642	96,4 – –
Путь № 21 (выставочный), при этом Track No 21 (exhibition), in this case: один локомотив на пути one locomotive on the track два локомотива на пути two locomotives on the track	1 301 468 833	90,3 – –
Путь № 22 (выставочный), при этом Track No 22 (exhibition), in this case: один локомотив на пути one locomotive on the track два локомотива на пути two locomotives on the track три локомотива на пути three locomotives on the track четыре локомотива на пути four locomotives on the track пять локомотивов на пути five locomotives on the track	1 416 216 397 384 310 109	98,3 – – – – –
Путь № 23 (выставочный), при этом Track No 23 (exhibition), in this case: один локомотив на пути one locomotive on the track два локомотива на пути two locomotives on the track три локомотива на пути three locomotives on the track	1 239 90 659 490	86,0 – – –
Путь № 27 (выставочный), при этом Track No 27 (exhibition), in this case: один локомотив на пути one locomotive on the track два локомотива на пути two locomotives on the track	1 058 1 025 33	73,5 – –
Путь № 28 (выставочный), при этом Track No 28 (exhibition), in this case: один локомотив на пути one locomotive on the track два локомотива на пути two locomotives on the track	944 944 0	65,6 – –

По результатам моделирования работы локомотивного комплекса постоянного тока определено среднее время оборота по станции для локомотивов серии: ЭП2К – 4,72 ч (превышает норму на 1,90 ч); ВЛ10 – 4,51 ч (превышает норму на 0,59 ч); 2ЭС6 – 4,39 ч (превышает норму на 0,92 ч).

По данным табл. 4 составлена сравнительная характеристика загрузки путей ПТОЛ и выставочных путей соответственно (рис. 6).

Сравнительная характеристика ПТОЛ указывает на высокую загрузку путей хотя бы одним локомотивом, которая составляет в среднем 87 %. При этом загрузка путей ПТОЛ

при максимальном количестве локомотивов в среднем – 56,6 %. Сравнительная характеристика загрузки выставочных путей № 21–23 показывает их высокую загрузку – 91,5 %. Загрузка путей № 27, 28 одним локомотивом в среднем составляет 69,6 % при вместимости, равной двум локомотивам. За счет того, что данные пути являются тупиковыми, на них не ставят два локомотива одновременно.

Исходя из результатов выполненного анализа загрузки выставочных путей можно сделать вывод, что путевого развития локомотивного комплекса при существующих размерах движения недостаточно.

Согласно [1, 2, 21, 22] тенденция развития железнодорожного транспорта до 2030 г. предусматривает специализацию Восточного полигона на контейнерных и пассажирских пе-

ревозках в большей мере. Перспективные размеры движения по станции M на 2030 г. представлены на рис. 7.

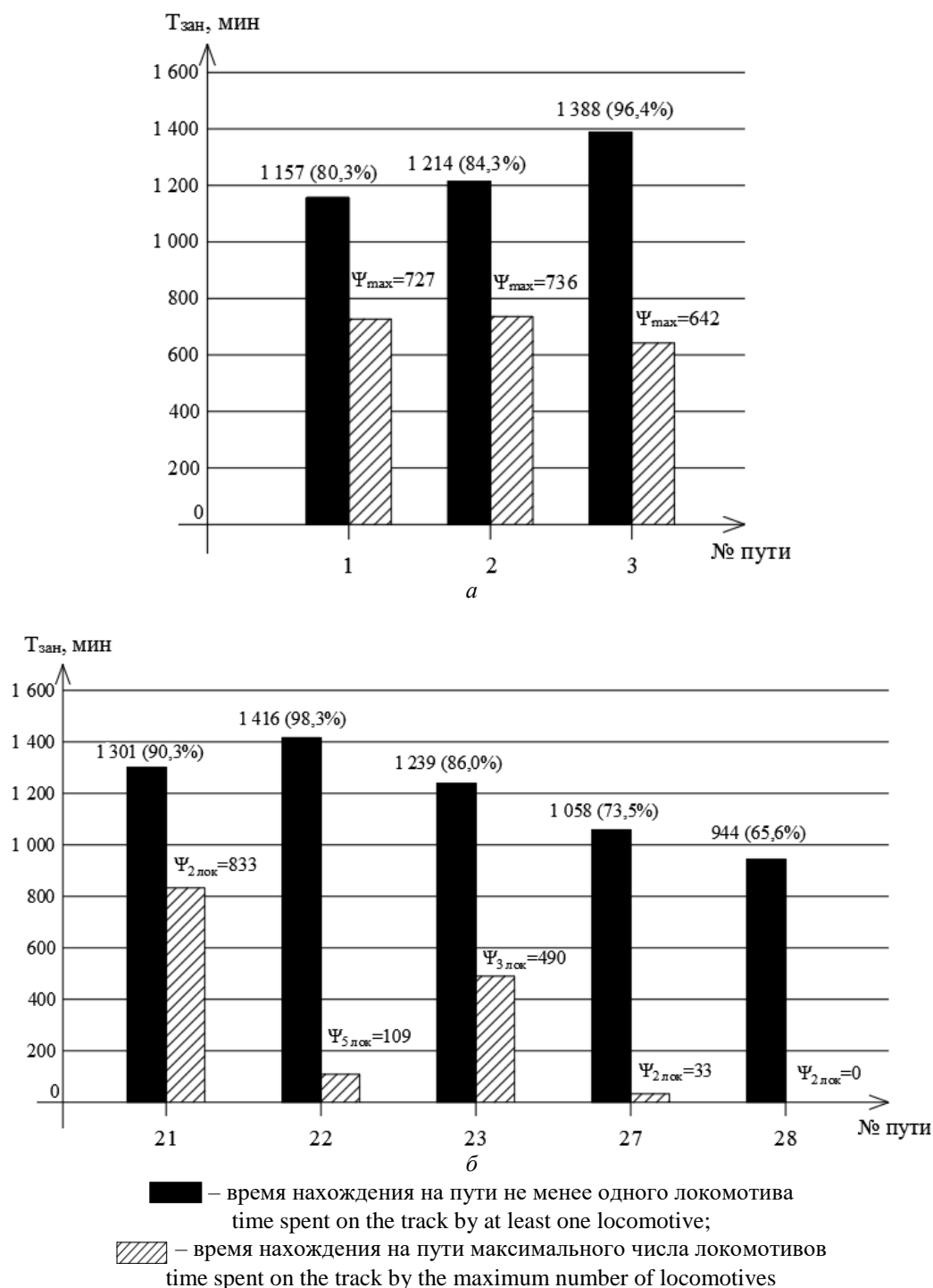


Рис. 6. Сравнительная характеристика загрузки инфраструктурного комплекса:
 a – пути пункта технического обслуживания локомотивов; $б$ – выставочные пути

Fig. 6. Comparative characteristics of infrastructure complex utilization:
 a – locomotive maintenance yard tracks; $б$ – exhibition tracks

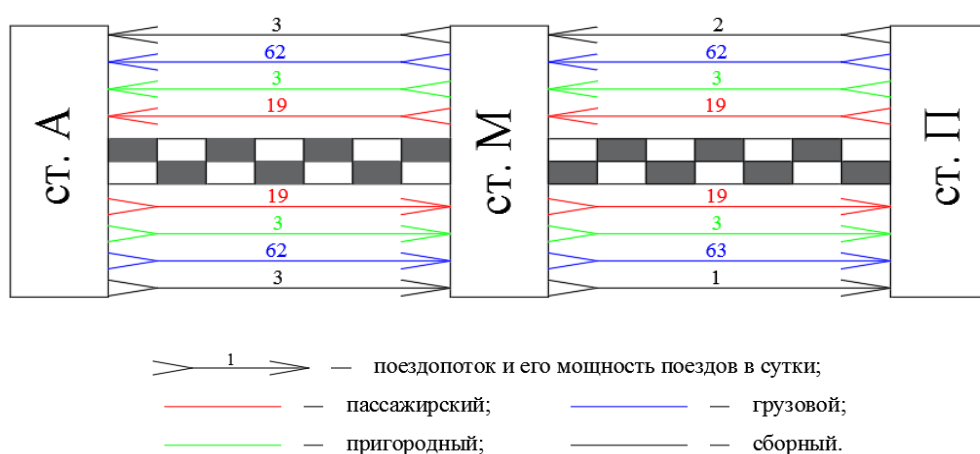


Рис. 7. Перспективные среднесуточные поездопотоки станции на 2030 г.

Fig. 7. Projected average daily train traffic at the station in 2030

Таким образом, с целью эффективного развития и организации бесперебойной работы объекта исследования при увеличении размеров движения на 30 % необходимо предусмотреть сооружение дополнительных выставочных путей.

Моделирование работы локомотивного комплекса на перспективные объемы работы

Для развития и оптимальной работы станции при увеличении размеров движения требуется предусмотреть дополнительные выставочные пути. Укладка новых путей позволит переставлять большее количество локомотивов в ожидании отправления со станции, что сократит загрузку путей ПТОЛ и уменьшит затраты времени на перестановку локомотивов после прохождения ТО-2 на пути западного парка.

Реконструкция локомотивного комплекса предусматривает реализацию групп мероприятий.

1. Строительство выставочных путей № 201–204, предназначенных для отстоя локомотивов после выхода из депо. Выполненное моделирование работы локомотивного комплекса показало, что в настоящее время из-за отсутствия указанных путей возникает необходимость перестановки локомотивов после выполнения ТО-2 на пути № 21–23, которые являются продолжением путей ПТОЛ. При этом все передвижения производятся с угловыми заездами, в том числе с выполнением технологических операций по смене кабины управления локомотивом. В связи с этим возникают дополнительные

простои и излишние пробеги локомотивов по инфраструктуре локомотивного комплекса.

Строительство указанных путей позволит обеспечить поточность пропуска локомотивов в локомотивном комплексе переменного тока. В частности, после выполнения операции по ТО-2 и экипировке локомотивов в депо, будет производиться их уборка на проектируемые пути с последующей подачей на пути западного парка станции, подача на пути четного парка станции будет производиться с путей № 21–23.

2. Строительство соединительного пути между стрелками № 727 и 714, реконструкция выставочных путей № 21–23.

3. Укладка проектируемых выставочных путей на существующей площадке между стрелками № 102 и 700. Укладка выставочных путей предусматривает демонтаж участка пути между стрелками № 673 и 700, что позволяет сократить время следования локомотивов из ПТОЛ на пути западного парка.

4. Для укладки проектируемого участка пути между стрелками № 727 и 714 предусматривается демонтаж участков пути между стрелками № 714 и 622, № 714 и 140. Данные мероприятия позволят следовать поездным локомотивам с путей № 19, 21, 23 нечетного парка станции на пути № 1–3 ПТОЛ. Укладка путей предусмотрена рельсами Р65, укладка стрелочных переводов произведена маркой М 1/9, планируется их централизация. Прямые вставки между стрелочными переводами предусмотрены по нормам для прочих путей – 6,25 м [1, 18, 21].

Реализация данного мероприятия предусматривает, чтобы до реконструкции локомо-

тивного комплекса станции выполнить реконструкцию нечетного парка, в том числе предусмотреть возможность использования для пропуска транзитных поездов путей № 19, 21, 23 (которые станут приемоотправочными). Таким образом, возникнет необходимость обеспечения уборки поездных локомотивов с указанных путей на пути № 1–3 локомотивного депо. Предусмотренные реконструктивные мероприятия позволят обеспечить реализацию технологии работы станции с учетом ее рекон-

струкции по другим этапам развития согласно генеральной схеме развития Восточного полигона железных дорог.

Указанное количество путей обосновано результатами моделирования работы локомотивного комплекса (табл. 5). Расчет загрузки путей ПТОЛ и выставочных путей представлен в табл. 6 [1, 18, 21]. На рис. 8 сравнительная характеристика загрузки путей ПТОЛ и выставочных путей соответственно.

Таблица 5. Показатели работы локомотивного комплекса с учетом модернизации
Table 5. Performance indicators of the locomotive complex taking into account modernization

Показатель	Значение, час.	
	нормативное	фактическое
<i>Локомотивный комплекс постоянного тока</i>		
Количество локомотивов, поступивших в локомотивный комплекс, в том числе Number of locomotives received by the locomotive complex, including:	–	19
– пассажирские локомотивы passenger locomotives	–	64
– грузовые локомотивы freight locomotives		
Количество локомотивов, прошедших ТО-2, в том числе Number of locomotives that passed TO-2, including:	–	6
– пассажирские локомотивы passenger locomotives	–	5
– грузовые локомотивы freight locomotives		
Среднее время оборота локомотивов, ч Average locomotive turnaround time, h:		4,96
– пассажирские локомотивы серии ЭП2К passenger locomotives of the EP2K series	2,82	
– грузовые локомотивы, в том числе серии freight locomotives, including the following series:		
ВЛ10	3,92	4,31
2ЭС6	3,47	4,03
<i>Локомотивный комплекс переменного тока</i>		
Количество локомотивов, поступивших в локомотивный комплекс, в том числе Number of locomotives received by the locomotive complex, including:	–	19
– пассажирские локомотивы passenger locomotives	–	64
– грузовые локомотивы freight locomotives		
Количество локомотивов, прошедших ТО-2, в том числе Number of locomotives that passed TO-2, including:	–	9
– пассажирские локомотивы passenger locomotives	–	35
– грузовые локомотивы freight locomotives		
Среднее время оборота локомотивов, ч Average locomotive turnaround time, h:		
– пассажирские локомотивы серии ЭП1	3,81	5,25

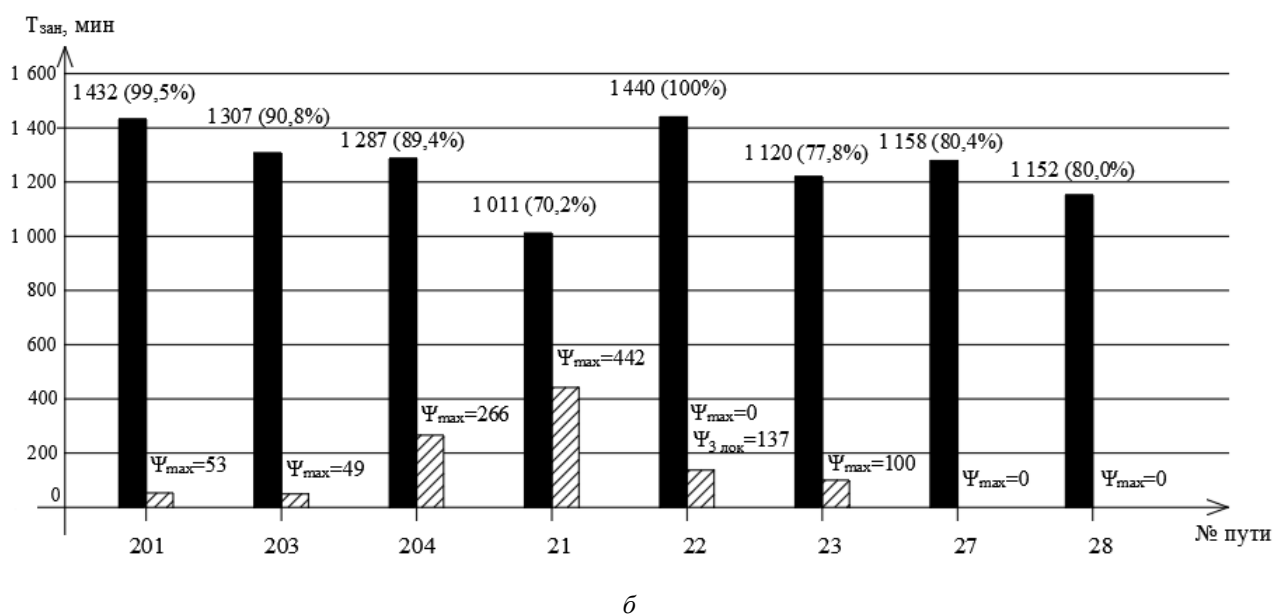
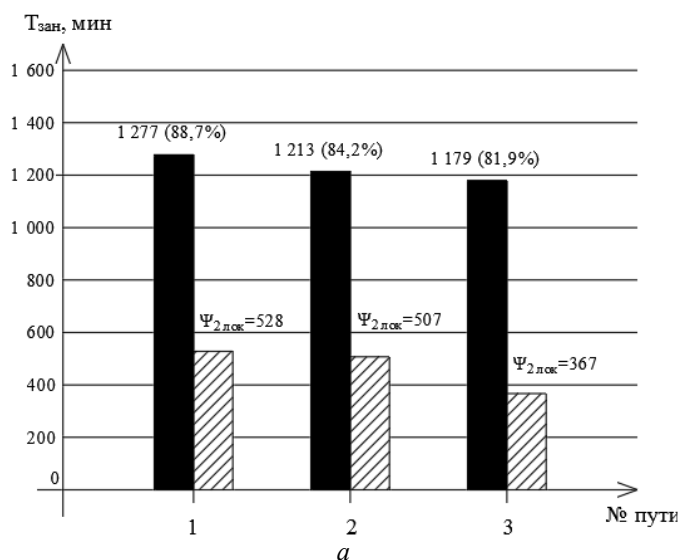
passenger locomotives of the EP1 series		
– грузовые локомотивы, в том числе серии		
freight locomotives, including the following series:		
ВЛ85	4,31	3,28
ЗЭС5К	4,31	3,91
1,5ВЛ80	4,31	3,65
ВЛ80	4,31	3,23
ЗЭС5К	4,31	3,51

Таблица 6. Загрузка путей пункта технического обслуживания локомотивов и выставочных путей с учетом модернизации локомотивного комплекса

Table 6. Loading of locomotive maintenance and exhibition tracks taking into account the modernization of the locomotive complex

Путь	Время занятия, мин	Загрузка, %
Путь № 1 (ПТОЛ), при этом Track No 1 (PTOL), in this case:	1 277	88,7
один локомотив на пути one locomotive on the track	749	–
два локомотива на пути two locomotives on the track	528	–
Путь № 2 (ПТОЛ), при этом Track No 2 (PTOL), in this case:	1 213	84,2
один локомотив на пути one locomotive on the track	706	–
два локомотива на пути two locomotives on the track	507	–
Путь № 3 (ПТОЛ), при этом Track No 3 (PTOL), in this case:	1 179	81,9
один локомотив на пути one locomotive on the track	812	–
два локомотива на пути two locomotives on the track	367	–
Путь № 201 (выставочный), при этом Track No 201 (exhibition), in this case:	1 432	99,5
один локомотив на пути one locomotive on the track	311	–
два локомотива на пути two locomotives on the track	550	–
три локомотива на пути three locomotives on the track	518	–
четыре локомотива на пути four locomotives on the track	53	–
Путь № 203 (выставочный), при этом Track No 203 (exhibition), in this case:	1 307	90,8
один локомотив на пути one locomotive on the track	323	–
два локомотива на пути two locomotives on the track	539	–
три локомотива на пути three locomotives on the track	396	–
четыре локомотива на пути four locomotives on the track	49	–
Путь № 204 (выставочный), при этом Track No 204 (exhibition), in this case:	1 287	89,4
один локомотив на пути one locomotive on the track	315	–
два локомотива на пути two locomotives on the track	706	–
три локомотива на пути three locomotives on the track	266	–
Путь № 21 (выставочный), при этом Track No 21 (exhibition), in this case:	1 011	70,2
один локомотив на пути one locomotive on the track	569	–
два локомотива на пути two locomotives on the track	442	–
Путь № 22 (выставочный), при этом Track No 22 (exhibition), in this case:	1 440	100
один локомотив на пути one locomotive on the track	643	–
два локомотива на пути two locomotives on the track	660	–
три локомотива на пути three locomotives on the track	137	–
четыре локомотива на пути four locomotives on the track	–	–
пять локомотивов на пути five locomotives on the track	–	–
Путь № 23 (выставочный), при этом Track No 23 (exhibition), in this case:	1 120	77,8
один локомотив на пути one locomotive on the track	849	–
два локомотива на пути two locomotives on the track	171	–
три локомотива на пути three locomotives on the track	100	–

Путь № 27 (выставочный), при этом Track No 27 (exhibition), in this case:	1 158	80,4
один локомотив на пути one locomotive on the track	1 158	–
два локомотива на пути two locomotives on the track	–	–
Путь № 28 (выставочный), при этом Track No 28 (exhibition), in this case:	1 152	80,0
один локомотив на пути one locomotive on the track	1 152	–
два локомотива на пути two locomotives on the track	–	–



■ – время нахождения на пути не менее одного локомотива
time spent on the track by at least one locomotive;

▨ – время нахождения на пути максимального числа локомотивов
time spent on the track by the maximum number of locomotives

Рис. 8. Сравнительная характеристика загрузки инфраструктурного комплекса с учетом модернизации:

а – пути пункта технического обслуживания локомотивов; б – выставочные пути

Fig. 8. Comparative characteristics of the infrastructure complex's loading, taking into account modernisation:

а – tracks of the locomotive maintenance centre; б – exhibition tracks

Примененные реконструктивные мероприятия вызвали сокращение простоя локомотивов в локомотивном комплексе, а также снижение загрузки существующих выставочных путей № 21–23.

Расчет экономической эффективности проекта произведен методом динамического моделирования денежных потоков.

Показатели и критерии эффективности проекта

В качестве основных показателей, используемых для расчета экономической эффективности данного инвестиционного проекта, использовались: чистый дисконтированный доход (ЧДД, *NPV*); индекс доходности дисконтированных инвестиций (ИДД, *DPI*); срок окупаемости с учетом дисконтирования ($T_{ок}$, *DPP*).

Результаты расчета показателей экономической эффективности приведены в табл. 7.

Таким образом, по показателям ЧДД и ИДД представленный проект можно признать экономически эффективным. По показателю

срока окупаемости вывод об экономической целесообразности инвестирования в данный проект делает инвестор.

На рис. 9 представлен график изменения ЧДД согласно рассчитанным по итогам моделирования технико-экономическим параметрам данного проекта [1, 21–24].

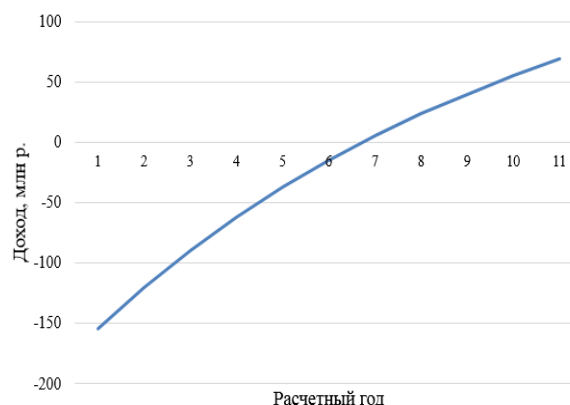


Рис. 9. График изменения чистого дисконтированного дохода

Fig. 9. Graph of changes in net present value

Таблица 7. Показатели экономической эффективности проекта

Table 7. Project economic efficiency indicators

Показатель Indicator	Значение показателя Value of the indicator	Критерий экономической эффективности Economic criterion efficiency	Результаты Results
Инвестиционные затраты по проекту, млн руб. Investment costs according to the project, million rub.	154,23	—	—
Ставка дисконтирования, % Discount rate, %	1,1	—	—
Чистый дисконтированный доход (ЧДД, <i>NPV</i>) за 11 лет, млн руб. Net present value (<i>NPV</i>) for 11 years, million rub.	68,78	ЧДД (<i>NPV</i>) > 0	Проект эффективен The project is effective
Дисконтированный срок окупаемости инвестиций (<i>DPP</i>), лет Discounted term return on investment (<i>DPP</i>), years	6,73	$DPP < \text{величины допустимого инвестором срока окупаемости инвестиций}$	Зависит от допустимого инвестором срока окупаемости инвестиций Depends on the term allowed by the investor return on investment
Индекс доходности дисконтированных инвестиций (ИДД, <i>DPI</i>) за 11 лет Discounted Investment Profit Index (<i>DPI</i>) in 11 years	1,81	ИДД (<i>DPI</i>) > 1	Проект эффективен

ИДД за 11 лет составил 1,81. Это значит, что на конец одиннадцатого года от начала реализации проекта на каждый вложенный рубль инвестор уже получил 0,81 руб. прибыли.

Заключение

Предложенные реконструктивные мероприятия вызовут сокращение простоя локомотивов в локомотивном комплексе, а также снижение загрузки существующих выставочных путей № 21–23.

Расчет экономической эффективности проекта производился методом динамического моделирования денежных потоков, в результате

чего было выяснено, что величина потребных инвестиций составила 154,23 млн руб. Суммарные эксплуатационные издержки на содержание новых элементов инфраструктурного комплекса с учетом увеличения их загрузки на 20 % за 11 лет от начала реализации проекта составляют 15,30 млн руб. ЧДД за 11 лет – 68,78 млн руб.

Таким образом, по показателям ЧДД и ИДД проект можно признать экономически эффективным. Дисконтированный срок окупаемости инвестиций – шесть лет девять месяцев.

Список литературы

1. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : офиц. сайт. URL : <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 11.06.2025).
2. Социально-экономические механизмы на транспорте / Е.Л. Андреевна, Н.А. Анисимова, Н.А. Афанасьева и др. Красноярск : КРИЖТ, 2025. 239 с.
3. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
4. Аналитические материалы к «Правительственному часу» в Государственной Думе 13 марта 2024 года : о перспективах развития железнодорожного транспорта // Библиотечные и архивные ресурсы Государственной Думы : сайт. URL : https://parlib.duma.gov.ru/common/upload/document_pravchas/gh13032024_s.pdf (Дата обращения 11.06.2025).
5. РЖД болеют за 10 тысяч локомотивов // Vgudok : сайт. URL : <https://vgudok.com/lenta/rzhd-boleyut-za-10-tysyach-lokomotivov-deficit-manevrovyyh-mashin-nehvatka-mashinistov-ten> (Дата обращения 10.06.2025).
6. РЖД снова не хватает исправных локомотивов // Дзен : сайт. URL : <https://dzen.ru/a/Z647pnZEshaRuJZ1> (Дата обращения 10.06.2025).
7. Движущая сила РЖД // Гудок : сайт. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1675726&ysclid=mf7tgb1xp4437474993ten> (Дата обращения 09.06.2025).
8. Тарасова О.В., Урина У.С., Горюшкина Е.А. Оценка вариантов использования мощностей Восточного полигона // Проблемы прогнозирования. 2025. № 2 (209). С. 167–179.
9. Оленевич В.А., Власова Н.В. Вопросы моделирования работы локомотивного комплекса с целью обоснования возможности освоения перспективных грузопотоков на восточном направлении страны // Постсоветский материк. 2025. № 3 (47). С. 70–84.
10. Чумакина А.Е., Черткова Е.Е., Асташков Н.П. Анализ факторов, оказывающих влияние на показатели эксплуатационной работы Восточного полигона железных дорог // Профессия инженер : сб. ст. XIII Всерос. молодеж. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. Орел, 2025. С. 335–338.
11. Недоступ И.С., Карпец О.В. Возможности улучшения пропускной способности восточного направления РФ // Молодежь. Наука. Инновации. 2025. Т. 1. С. 299–303.
12. Automation of the procedure for assessing the quality of transport service for the population in the conditions of digitalization of the railway transportation system / T.A. Bulokhova, V.A. Olentsevich, V.Yu. Konyukhov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novosibirsk, 2020. DOI 10.1088/1757-899X/1064/1/012006.
13. Каимов Е.В., Оленевич В.А., Максимова Р.В. Актуальность вопросов перераспределения технических мощностей Восточного полигона железных дорог // Актуальные проблемы транспорта в XXI веке : тр. II Междунар. науч.-практ. конф. Новокузнецк, 2023. С. 185–188.
14. Горшков В.В., Оленевич В.А. Определение оптимальных схем многосуточных закрытий перегонов для производства ремонтных работ на Восточном полигоне // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2024. № 3 (40). С. 50–59.
15. Ермоленко И.Ю., Морозов Д.В., Асташков Н.П. Влияние продольных нагрузок на безопасность движения при эксплуатации на горно-перевальных участках пути // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2021. № 2 (82). С. 104–111.
16. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The Use of «Technical Rigidity» Indices to Assess Climatic Factors Effects on Power Transformers Reliability // Proceedings of the 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Chelyabinsk, 2020. P. 136–141. DOI 10.1109/UralCon49858.2020.9216258.
17. Виртуальное сцепление и расцепление поездов в движении. Технологические преимущества / А.О. Иванов, Е.А. Добряков, И.С. Тимофеев и др. // Актуальные вопросы науки 2025 : сб. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2025. С. 32–38.
18. Об утверждении методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования : приказ Минтранса РФ от 18.07.2018 г. № 266. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.

19. Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Фуфачева М.В. Учет задержек длинносоставных поездов под обгонами при выборе оптимальной этапности удлинения станционных путей // Железнодорожный транспорт. 2008. № 2. С. 24–26.
20. Иванков А.Н., Четчуев М.В. Проблемы поэтапного наращивания мощности объектов железнодорожной инфраструктуры для овладения перевозками // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки : тр. юбил. междунар. науч.-практ. конф. Москва, 2024. С. 228–232.
21. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте (приложение к Указанию МПС России от 31.08.1998 № 1024-у).
22. Assessment of Secondary Delays of Rolling Stock at Intersections / L. Ivankova, A. Ivankov, A. Kuznetsova et al. // Transportation Research Procedia : Collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability (TITDS-XIII 2022). Irkutsk – Krasnoyarsk, 2022. P. 314–317.
24. Эсаулов В.А. Модель возврата поездопотока с припортовых и пограничных станций восточного полигона в условиях реализации максимальной выгрузки // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2025. № 2 (43). С. 90–94.
25. Каутц В.Э., Журавлева О.В. Алгоритм повышения плановой эффективности работы предприятия на примере Восточно-Сибирской железной дороги // Экономика и предпринимательство. 2025. № 8 (181). С. 1380–1383.

References

1. Rossiiskie zheleznye dorogi (elektronnyi resurs) [Russian Railways (electronic resource)]. Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed June 11, 2025).
2. Andreyanova E.L., Anisimova N.A., Afanasyeva N.A. et al. Sotsial'no-ekonomicheskie mekhanizmy na transporte [Socio-economic mechanisms in transport]. Krasnoyarsk: KrIZhT Publ., 2025. 239 p.
3. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»].
4. Analiticheskie materialy k «Pravitel'stvennomu chasu» v Gosudarstvennoi Dume 13 marta 2024 goda «O perspektivakh razvitiya zheleznodorozhnogo transporta» (elektronnyi resurs) [Analytical materials for the «Government Hour» in the State Duma on March 13, 2024 «On the prospects for the development of railway transport» (electronic resource)]. Available at: https://parlib.duma.gov.ru/common/upload/document_pravchas/gh13032024_s.pdf (Accessed June 11, 2025).
5. RZhD boleyut za 10 tysyach lokomotivov (elektronnyi resurs) [Russian Railways is rooting for 10,000 locomotives (electronic resource)]. Available at: <https://vgudok.com/lenta/rzhd-boleyut-za-10-tysyach-lokomotivov-deficit-manevrovyh-mashin-nehvotka-mashinistov-ten> (Accessed June 10, 2025).
6. RZhD snova ne khvataet ispravnykh lokomotivov (elektronnyi resurs) [Russian Railways is again short of serviceable locomotives (electronic resource)]. Available at: <https://dzen.ru/a/Z647pnZEshaRuJZ1> (Accessed June 10, 2025).
7. Dvizhushchaya sila RZhD (elektronnyi resurs) [The driving force of Russian Railways (electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1675726&ysclid=mf7tgb1xp4437474993ten> (Accessed June 9, 2025).
8. Tarasova O.V., Urina U.S., Goryushkina E.A. Otsenka variantov ispol'zovaniya moshchnosti Vostochnogo poligona [Evaluation of options for using the capacities of the Eastern polygon]. *Problemy prognozirovaniya* [Problems of forecasting], 2025, no 2 (209), pp. 167–179.
9. Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Voprosy modelirovaniya raboty lokomotivnogo kompleksa s tsel'yu obosnovaniya vozmozhnosti osvoeniya perspektivnykh gruzopotokov na vostochnom napravlenii strany [Issues of modeling the operation of the locomotive complex in order to substantiate the possibility of developing promising cargo flows in the eastern direction of the country]. *Postsovetiskii materik* [Post-Soviet continent], 2025, no 3 (47), pp. 70–84.
10. Chumakina A.E., Chertkova E.E., Astashkov N.P. Analiz faktorov, okazyvayushchikh vliyanie na pokazateli ekspluatatsionnoi raboty Vostochnogo poligona zheleznykh dorog [Analysis of factors influencing the performance of the Eastern Railway polygon]. *Sbornik statei XIII Vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 80-letiyu Pobedy v Velikoi Otechestvennoi voine «Professiya inzhener»* [Proceedings of the XIII All-Russian Youth Scientific and Practical Conference dedicated to the 80th anniversary of Victory in the Great Patriotic War «Profession engineer»]. Orel, 2025, pp. 335–338.
11. Nedostup I.S., Karpets O.V. Vozmozhnosti uluchsheniya propusknoi sposobnosti vostochnogo napravleniya RF [Possibilities of improving the capacity of the eastern direction of the Russian Federation]. *Molodezh'. Nauka. Innovatsii* [Youth. Science. Innovation], 2025, Vol. 1, pp. 299–303.
12. Bulokhova T.A., Olentsevich V.A., Konyukhov V.Yu., Lysenko D.A. Automation of the procedure for assessing the quality of transport service for the population in the conditions of digitalization of the railway transportation system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novosibirsk, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012006.
13. Kaimov E.V., Olentsevich V.A., Maksimova R.V. Aktual'nost' voprosov pereraspredeleniya tekhnicheskikh moshchnostei Vostochnogo poligona zheleznykh dorog [The relevance of issues of redistribution of technical capacities of the Eastern polygon of railways]. *Trudy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy transporta v XXI veke»* [Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference «Actual problems of transport in the XXI century»]. Novokuznetsk, 2023, pp. 185–188.
14. Gorshkov V.V., Olentsevich V.A. Opredelenie optimal'nykh skhem mnogodnevnykh zakrytii peregonov dlya proizvodstva remontnykh rabot na Vostochnom poligone [Determination of optimal schemes for multi-day lane closures for repair work at the Eastern polygon]. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona* [Transport of the Asia-Pacific region], 2024, no 3 (40), pp. 50–59.
15. Ermolenko I.Yu., Morozov D.V., Astashkov N.P. Vliyanie prodol'nykh nagruzok na bezopasnost' dvizheniya pri ekspluatatsii na gorno-pereval'nykh uchastkakh puti [Influence of longitudinal loads on traffic safety during operation on mountain-

transshipment sections of the track]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2021, no 2 (82), pp. 104–111.

16. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The Use of «Technical Rigidity» Indices to Assess Climatic Factors Effects on Power Transformers Reliability // Proceedings of the 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Chelyabinsk, 2020, pp. 136–141. DOI : 10.1109/UralCon49858.2020.9216258.

17. Ivanov A.O., Dobryakov E.A., Timofeev I.S., Tszin S. Virtual'noe stseplenie i rastseplenie poezdov v dvizhenii. Tekhnologicheskie preimushchestva [Virtual coupling and uncoupling of trains in motion. Technological advantages]. *Sbornik statei IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye voprosy nauki 2025»* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «Actual issues of science 2025»]. Penza, 2025, pp. 32–38.

18. Prikaz Mintransa RF ot 18.07.2018 g. № 266 «Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya propusknoi i provoznoi sposobnosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshchego pol'zovaniya» [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated July 18, 2018 No 266 «On approval of the methodology for determining the throughput and carrying capacity of the infrastructure of public railway transport»].

19. Ivankova L.N., Ivankov A.N., Fufacheva M.V. Uchet zaderzhek dlinnosostavnykh poezdov pod obgonami pri vybere optimal'noi etapnosti udlineniya stantsionnykh putei [Consideration of delays of long-distance trains under overtaking when choosing the optimal stage lengthening of station tracks]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2008, no 2, pp. 24–26.

20. Ivankov A.N., Chetchuev M.V. Problemy poetapnogo narashchivaniya moshchnosti ob'ektov zheleznodorozhnoi infrastruktury dlya ovladeniya перевозками [Problems of step-by-step capacity increase of railway infrastructure facilities for mastering transportation]. *Trudy yubileinoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Akademik Vladimir Nikolaevich Obraztsov – osnovopolozhnik transportnoi nauki»* [Proceedings of the jubilee international scientific and practical conference «Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov – the founder of transport science»]. Moscow, 2024, pp. 228–232.

21. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke investitsionnykh proektov na zheleznodorozhnom transporte (prilozhenie k Ukazaniyu MPS Rossii ot 31.08.1998 № 1024-u) [Methodological recommendations for the evaluation of investment projects in railway transport (appendix to the Instruction of the Ministry of Railways of Russia dated August 31, 1998 No 1024-u)].

22. Ivankova L., Ivankov A., Kuznetsova A., Kartsan I. Assessment of Secondary Delays of Rolling Stock at Intersections // Collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability (TITDS-XIII 2022) «Transportation Research Procedia». Irkutsk – Krasnoyarsk, 2022, pp. 314–317.

24. Esaulov V.A. Model' vozvrata poezdopotoka s priortovykh i pogranichnykh stantsii vostochnogo poligona v usloviyakh realizatsii maksimal'noi vygruzki [Model of train flow return from the portside and border stations of the eastern landfill in conditions of maximum unloading]. *Transport Aziatsko-Tikhoookeanskogo regiona* [Transport of the Asia-Pacific region], 2025, no 2 (43), pp. 90–94.

25. Kautts V.E., Zhuravleva O.V. Algoritmy povysheniya planovoi effektivnosti raboty predpriyatiya na primere Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi [An algorithm for increasing the planned efficiency of an enterprise using the example of the East Siberian Railway]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and entrepreneurship], 2025, no 8 (181), pp. 1380–1383.

Информация об авторах

Оленцевич Виктория Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olencevich_va@mail.ru.

Information about the authors

Victoriya A. Olentsevich, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olencevich_va@mail.ru.

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

INFORMATION TECHNOLOGY

Расчет напряженно-деформированного состояния днищевой секции судна-снабженца при кантовке в процессе изготовления с использованием программы «ЛИРА»

Д.М. Гнатив✉, А.С. Комаров, О.В. Арестов

Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Российская Федерация

✉gnatif@bk.ru

Резюме

В статье представлен расчет напряженно-деформированного состояния днищевой секции судна-снабженца при кантовке в процессе ее производства с использованием программного комплекса «ЛИРА». Это необходимо главным образом для проверки прочности конструктивных элементов секции, обухов и тросов при кантовке при ее изготовлении. Уделяется внимание моделированию граничных условий, в том числе закреплению обухов и распределению массовых нагрузок, а также учитываются особенности программного обеспечения, например, косвенное задание модуля упругости через параметр жесткости EI_y . Для верификации модели предварительно выполнены аналитические расчеты тавровых балок по классическим формулам сопротивления материалов. Сравнение результатов ручных вычислений и данных, полученных в программе «ЛИРА», показало расхождение менее 5 %, что подтверждает корректность принятых допущений и конечно-элементной модели. Анализ позволил определить районы концентрации максимальных напряжений и величины прогибов, которые не превышают допустимые пределы по нормативным документам. Установлены усилия, действующие на элементы крепления, что помогло обосновать выбор конструктивных решений и технологических параметров. Результаты расчета продемонстрировали высокую эффективность программного комплекса «ЛИРА» в инженерных задачах, следовательно, его применение обеспечит достоверное прогнозирование поведения конструкции под монтажными нагрузками. Полученные данные могут быть использованы при оптимизации технологической оснастки, а также с целью снижения рисков и повышения безопасности на производстве. Представленная методика подтверждает перспективность интеграции программы «ЛИРА» в инженерную практику проектирования и изготовления судовых конструкций.

Ключевые слова

напряженно-деформированное состояние, судно-снабженец, кантовка, программа «ЛИРА», деформации, прочность, тавровые элементы, эпюры напряжений

Для цитирования

Гнатив Д.М. Расчет напряженно-деформированного состояния днищевой секции судна-снабженца при кантовке в процессе изготовления с использованием программы «ЛИРА» / Д.М. Гнатив, А.С. Комаров, О.В. Арестов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 120–130. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).120-130.

Информация о статье

поступила в редакцию: 29.05.2025 г.; поступила после рецензирования: 09.06.2025 г.; принята к публикации: 10.06.2025 г.

Calculation of the stress-strain state of the bottom section of the supply vessel during edging in the process of manufacturing using the program «LIRA»

D.M. Gnativ✉, A.S. Komarov, O.V. Arestov

Maritime State University named after Admiral G.I. Nevel'skoi, Vladivostok, the Russian Federation

Abstract

The article presents a calculation of the stress-strain state of the bottom section of the supply vessel during edging in the course of production using the LIRA software package. This calculation is necessary to check the strength of the structural elements of the section, casings and cables during edging in the manufacturing process. Attention is paid to the modelling of boundary conditions, including the fastening of casings and the distribution of mass loads, and software features are also taken into account, such as the indirect setting of the modulus of elasticity through the stiffness parameter EI_y . To verify the model, analytical calculations of brand blocks were previously performed using classical formulas for the resistance of materials. A comparison of the results of manual calculations and the data obtained in the LIRA program showed a discrepancy of less than 5 %, which confirms the correctness of the accepted assumptions and the finite element model. The analysis allowed us to determine the areas of maximum stress concentration and deflection values that do not exceed the permissible limits according to regulatory documents. The forces acting on the fastening elements were established, which made it possible to justify the choice of design solutions and technological parameters. The calculation results demonstrated the high efficiency of the LIRA software package in engineering tasks,

providing reliable prediction of the behaviour of the structure under installation loads. The data obtained can be used to optimize technological equipment, reduce risks and increase safety during production. The presented methodology confirms the prospects of integrating the LIRA program into the engineering practice of designing and manufacturing ship structures.

Keywords

stress-strain state, supply vessel, edging, program «LIRA», deformations, strength, brand elements, stress diagrams

For citation

Gnativ D.M., Komarov A.S., Arestov O.V. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dnishchevoi seksii sudna-snabzhentsa pri kantovke v protsesse izgotovleniya s ispol'zovaniem programmy «LIRA» [Calculation of the stress-strain state of the bottom section of the supply vessel during edging in the process of manufacturing using the program «LIRA»]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 120–130. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).120-130.

Article Info

Received: May 29, 2025; Revised: June 9, 2025; Accepted: June 10, 2025.

Введение

В современном судостроении точное определение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивных элементов судов является ключевым аспектом обеспечения их безопасности, надежности и долговечности [1]. Особенно актуальна эта задача для судов специального назначения, таких как суда снабженцы, которые играют критически важную роль в морском сообществе, включая транспортировку грузов, техники и персонала на удаленные объекты, например, в нефтегазовой отрасли. Эти суда подвергаются сложным динамическим и статическим нагрузкам как в процессе эксплуатации, так и на этапах производства, что требует глубокого анализа их прочностных характеристик [2].

Одним из наиболее ответственных этапов в производстве крупных судовых секций является процесс кантовки (наклонения или подъема) конструкций для их монтажа и сборки. На данном этапе днищевая секция судна-снабженца испытывает значительные воздействия, включая изгибающие моменты, напряжения сдвига и деформации [3]. Неправильная оценка этих нагрузок может привести к деформациям, трещинам или даже критическим повреждениям, что негативно скажется на безопасности судна и экономической эффективности производства.

В рамках данной проблемы существует множество методов расчета, реализованных в современных программных комплексах, которые становятся неотъемлемой частью проектирования и анализа судовых конструкций. Однако многие из данных программ созданы зарубежными компаниями и не предоставляют свои услуги нашей отрасли. Программа «ЛИРА»,

разработанная отечественной компанией «ЛИРА софт», для моделирования и расчета строительных конструкций, способна решать некоторые специфические судостроительные задачи. Ее использование позволяет детально моделировать поведение материалов, учитывать нелинейности и геометрические особенности, а также прогнозировать потенциальные риски на ранних этапах проектирования.

Целью данной статьи является демонстрация расчетов НДС днищевой секции судна-снабженца при кантовке с использованием программного комплекса «ЛИРА» и анализ влияния различных факторов (форма сечения, распределение нагрузок, материалы) на прочностные характеристики конструкции. Результаты исследования могут быть использованы для снижения рисков повреждений и повышения эффективности конструктивных решений.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенный подход обеспечивает снижение затрат на испытания и корректировку конструкций. Он также соответствует современным стандартам безопасности, что особенно важно в условиях роста требований к энергоэффективности, экологичности и надежности морской техники.

Построение секции в программе «ЛИРА»

Для выполнения инженерного проектирования поперечной секции 0801 судна-снабженца требуется создать упрощенную геометрическую модель, основанную на замене сложных форм элементов конструкции на приближенные геометрические формы [4]. Такой подход позволяет минимизировать вычислительную сложность задачи, сохраняя при этом

правильность представления ключевых физических характеристик (рис. 1).

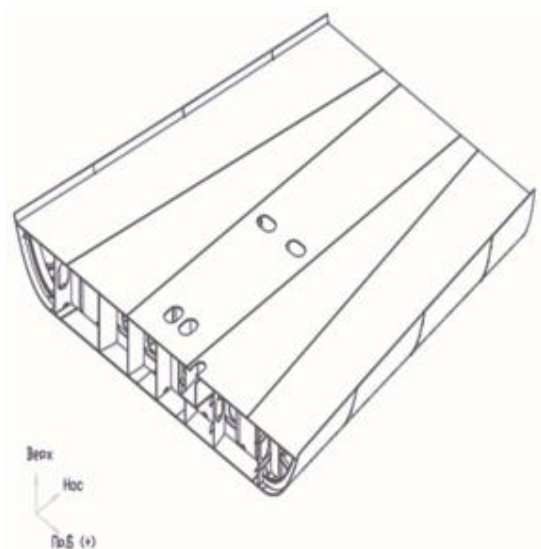


Рис. 1. Вид сечения в «корабельном» положении
Fig. 1. View of the section in the «ship» position

В рамках данного расчета поперечная сечения разбивается на четыре тавровые конструкции, каждая из которых характеризуется индивидуальными размерными параметрами поперечного сечения. Разделение на подобные элементы осуществляется с учетом локальных нагрузок, распределения напряжений и требований к жесткости конструкции (рис. 2) [5]. Под жесткостью конструкции принимаем ее способность сохранять свою первоначальную форму и расположение под воздействием нагрузок.

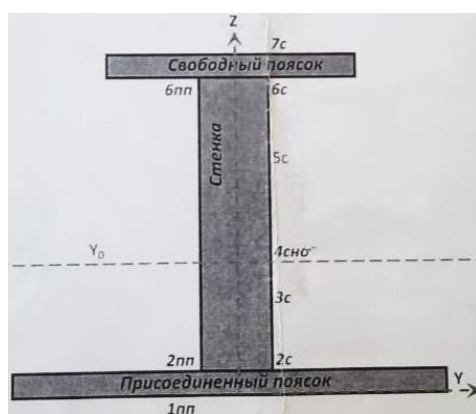


Рис. 2. Сечение двутавра
Fig. 2. I-beam section

Разбиение на четыре тавра различного профиля обеспечивает возможность проведения детализированного анализа механических

свойств. На основе методов теории упругости и сопротивления материалов проводится анализ НДС поперечного сечения, позволяющий определить геометрические характеристики сечения, включая моменты сопротивления, а также выявить критические точки с максимальными напряжениями. Эти параметры важны для оценки жесткости конструкции при динамических и статических нагрузках, возникающих в процессе эксплуатации судна [6]. Разделение сечения на тавровые элементы также обеспечивает возможность верификации полученных результатов с использованием специализированного программного обеспечения, например, системы «ЛИРА». Проверка расчетов в таких программах позволяет идентифицировать потенциальные несоответствия между аналитическими моделями и численными расчетами, что обеспечивает повышение надежности проектирования. Особое внимание при этом уделяется согласованности данных по распределению напряжений, упругим деформациям и нагрузкам, что напрямую влияет на безопасность и долговечность конструкции судна-снабженца [7].

Таким образом, применение геометрически упрощенной модели с декомпозицией сложных сечений на типовые тавровые профили, характерные для набора корпуса судна, позволяет ускорить расчеты без значительной потери точности. Это обеспечивает корректную оценку прочностных и жесткостных характеристик, что является обязательным условием при проектировании судовых конструкций. Этот подход позволяет интегрировать результаты анализа в комплексные системы моделирования, включая динамическое поведение судна, нагрузки от гидродинамических воздействий и другие факторы, что обеспечивает всестороннюю оценку надежности конструкции. Однако для построения эпюры нормальных напряжений необходимо взять за основу конструкции пластины, а не стержни (тавровые профили) как в нашем случае. Пример расчета основных характеристик двутавра, необходимых для проверки расчетов программы «ЛИРА», представлены в табл. 1 [8].

В таблице e – отстояние центральной оси от оси сравнения (см), рассчитываемое по [9]:

$$e = A/B,$$

где A – сумма площади всех связей; B – сумма статических моментов связей; I_y – момент инерции (см⁴), рассчитываемый по формуле:

Таблица 1. Расчет характеристик двутавра
Table 1. Calculation of I-beam characteristics

Наименование связи Name connections	Размер оси Y, мм Y-axis size, mm	Размер оси Z, мм Z-axis size, mm	Площадь F , см ² Area F , cm ²	Расстояние z , центр тяжести от оси ОО, см Distance z , center gravity from the OO axis, cm	Статический момент, см ³ Static moment, cm ³	Переносной момент инерции, см ⁴ Portable moment inertia, cm ⁴	Собственный момент инерции, см ⁴ Own moment inertia, cm ⁴
Присоединенный поясок Attached belt	184	15	27,6	0,65	17,9	11,7	5,2
Стенка Wall	9	1 400	126	71,5	9 009,0	644 143,5	205 800,0
Свободный поя- сок Loose belt	184	10	18,4	142	2 612,8	371 017,6	1,5
<i>Итого</i> <i>Total</i>			$A = 172$	–	$B = 11 639,7$	–	$C = 1 220 979,5$
e	I_y	$\sum z$	z_1	z_2	z_{\max}	z_{\min}	W_{\min} W_{\max}
67,67	433 284,4	142,5	67,67	74,83	74,83	67,67	5 790,48 6 402,63

$$I_y = C - A \cdot e^2,$$

где C – сумма всех переносных моментов инерции и собственных моментов инерции [10];
 $\sum z$ – общая высота профиля тавра:

$$\sum z = (z_{n.n} + z_{cm} + z_{св.н}) / 10.$$

Расстояние $z_1 = e$, а $z_2 = \sum z - e$ [11, 12];
 W_{\min} – минимальный момент сопротивления (см³), рассчитываемый по формуле:

$$W_{\min} = I_y / z_{\max},$$

где W_{\max} – максимальный момент сопротивления, см³, рассчитываемый по формуле [13, 14]:

$$W_{\max} = I_y / z_{\min},$$

После проведения расчета основных характеристик приступаем к построению секции в ПК «ЛИРА». Для этого нам потребуется схема крепления при проведении кантовки (рис. 3 и 4).

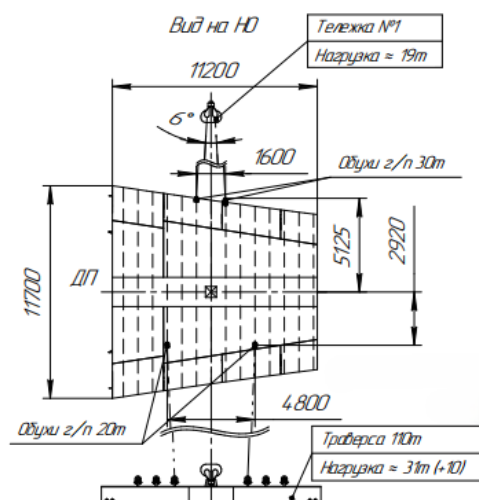


Рис. 3. Схема строповки в блоке корпусных производств краном грузоподъемностью 120 т
Fig. 3. Slinging diagram for a hull production unit using a 120-ton crane

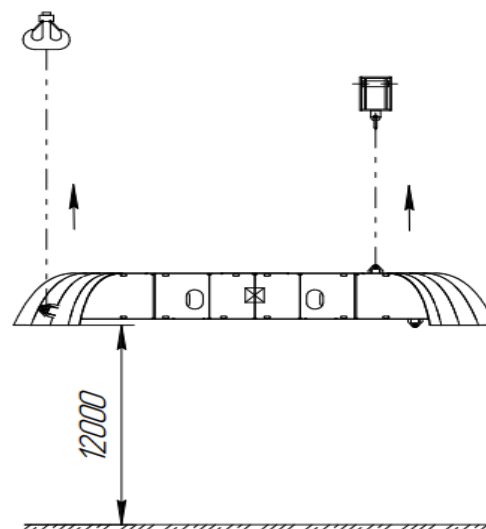


Рис. 4. Схема кантовки в блоке корпусных производств краном грузоподъемностью 120 т
Fig. 4. The tilting scheme in the hull prtion block with a crane with a lifting capacity of 120 tons

Перед построением упрощенной секции также ознакомимся с правилами и планом проведения кантовки.

1. Оградить участок такелажных работ предупреждающими табличками «Проход запрещен».

2. Первый этап (проверка прочности приварки обухов с последующим подъемом секции 0801):

- использовать 4 скобы грузоподъемностью 35 т с диаметром пальца не более 55 мм; стропы канатные для тележки № 1 – 2 шт. грузоподъемностью не ниже 30 т ($L = 10\,000$ мм), для траверсы (грузоподъемность 110 т) – 2 шт. грузоподъемностью не ниже 25 т ($L = 6\,000$ мм);

- поднять секцию за четыре обуха грузоподъемностью 20 т и за два обуха грузоподъемностью 30 т краном грузоподъемностью 120 т на высоту 200–300 мм от плоской части стенда, выдержать 15 мин., опустить;

- выполнить визуальный осмотр по РД5.121-85 [15];

- разрушение и деформация конструкций и сварных швов не допускаются;

- в районе третьего пролета блока корпусных производств поднять секцию на 12 000 мм для дальнейшей кантовки согласно схеме.

3. Второй этап (кантовка секции 0801):

- плавно опускать гак центральной тележки с одновременным горизонтальным движением в сторону траверсы грузоподъемностью 110 т, медленно начинать проворачивать секцию в вертикальное положение;

- при достижении вертикального положения относительно центра массы застопорить центральную тележку;

- отстропить обухи грузоподъемностью 20 т центральной тележки согласно схеме;

- перевести гак центральной тележки на противоположную сторону и застропить за обухи грузоподъемностью 20 т;

- плавно поднимая гак центральной тележки с одновременным горизонтальным движением, медленно начинать поворачивать секцию в вертикальное положение;

- плавно опустить секцию на стенд или водоопреснительную установку.

Для определения точного расположения элементов крепления (обухов) в поперечной секции судна-снабженца необходимо использовать данные схемы строповки, которая показывает информацию о распределении нагрузок, геометрических ограничениях и конструктивных особенностях. Эти сведения позволяют

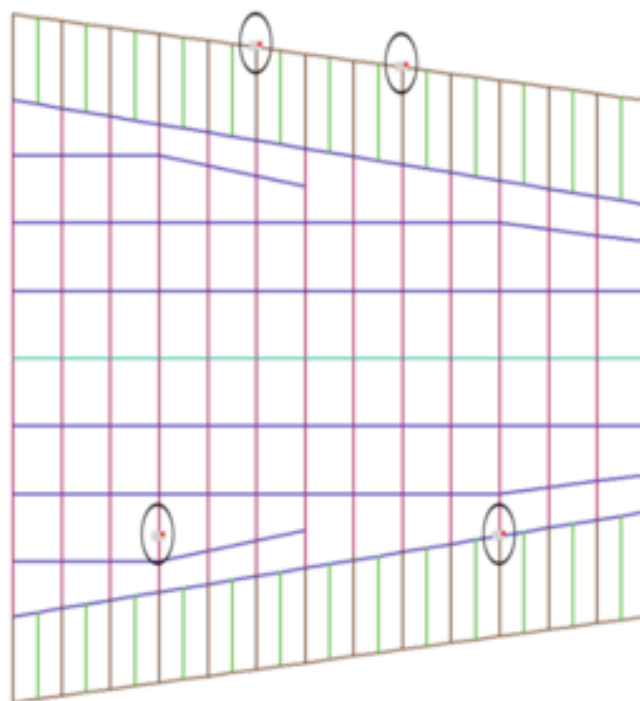


Рис. 5. Изображение днищевой секции (геометрически упрощенный вид)

Fig. 5. Image of the bottom section (geometrically simplified view)

определить координаты установки обухов, обеспечивающих механическую стабилизацию секции. Полученные данные визуализируются на упрощенной геометрической модели секции в масштабе 1:1 (рис. 5), где элементы крепления обозначаются специальными маркерами – окружностями с прямоугольниками в центре.

Двухтавровые балки и другие несущие элементы в упрощенной модели представлены различными цветовыми сегментами, что упрощает визуальное различение их функциональных ролей и взаимосвязей. Важно отметить, что в процессе моделирования исключаются конструктивные вырезы и технологические разрывы в сечениях, так как специализированное программное обеспечение (например, ЛИРА) не поддерживает их прямое отображение. Это упрощение допустимо при условии, что его влияние на общую механическую жесткость считается незначительным по сравнению с основными нагрузками. После интеграции всех элементов в единую систему координат проводится симуляция продольных и поперечных связей, что очень важно для оценки распределения напряжений и деформаций. Для анализа НДС днищевой секции моделируется равномерная нагрузка, эквивалентная весу собственной конструкции (49 671 кг) [16]. При этом

ключевую роль играет корректировка материальных свойств, так как программа «ЛИРА», разработанная в основном для строительных задач, не поддерживает прямое указание модуля упругости E . Для компенсации этого ограничения используется подход: модуль упругости вводится через параметр жесткости конструкции:

$$EI_y = E \cdot A,$$

где E – модуль упругости материала, равный $2,06 \cdot 10^{11}$ Па [17].

Результаты нагружения секции

После ввода всех параметров и нажатия на кнопку расчета программа формирует деформированную модель секции (рис. 6), демонстрирующую смещения элементов под действием нагрузок.

Визуализация включает сравнение исходной геометрии с деформированной, что позволяет оценить масштабы продольных и поперечных перемещений. Дополнительно, через функцию «Эпюры перерезывающих сил» программа генерирует распределение поперечных сил по секции (рис. 7), где максимальное значение (142 кН) фиксируется в точке крепления – это участок, требующий отдельного внимания или специального контроля.

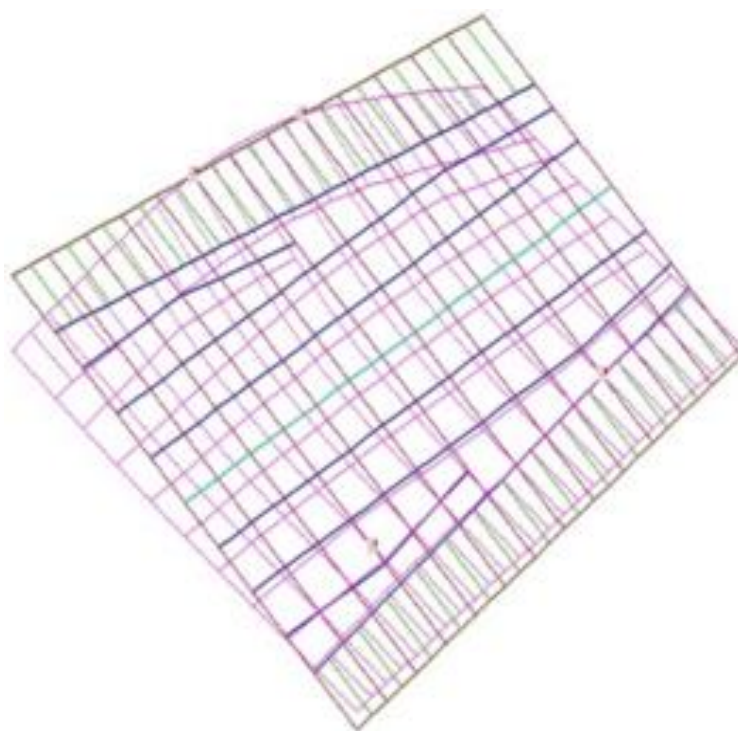


Рис. 6. Деформированная модель секции

Fig. 6. Deformed model of the section

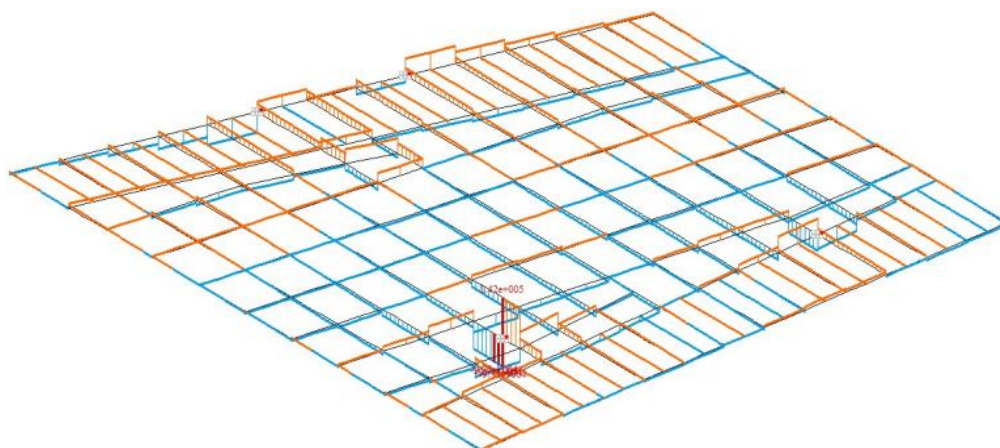
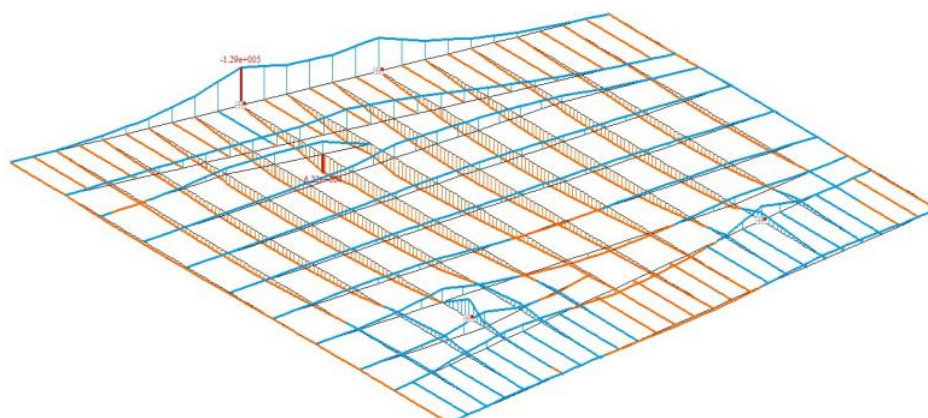
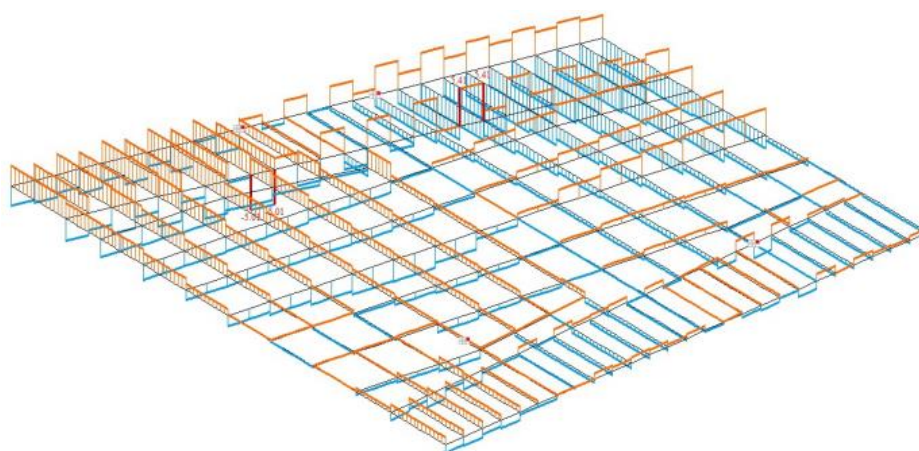


Рис. 7. Эпюры перерезывающих сил

Fig. 7. Shear force diagrams

Для оценки изгибающих моментов используется инструмент «Эпюры изгибающих моментов» (рис. 8 и 9), который демонстрирует зоны максимального напряжения в сечении, что необходимо для выбора материалов и профилей

элементов. Наконец, программа моделирует эпюру прогибов (рис. 10), отображающую максимальные деформации секции под нагрузкой.

Рис. 8. Эпюры изгибающих моментов M_y Fig. 8. Bending moment diagrams M_y Рис. 9. Эпюры изгибающих моментов M_x Fig. 9. Bending moment diagrams M_x

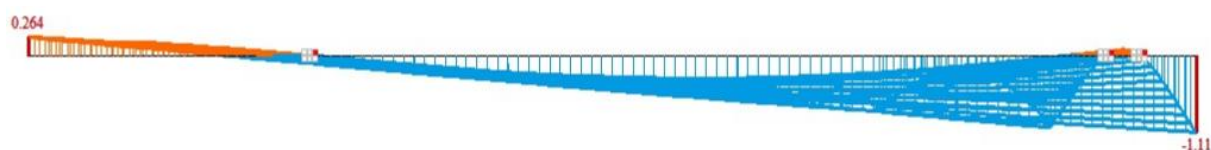


Рис. 10. Эпюра прогибов

Fig. 10. Sag diagram

Полученные данные формируют комплексную картину воздействий, позволяя определить «узкие места» конструкции, оценить резервы прочности и уточнить параметры в местах крепления обухов. Такой подход обеспечивает интеграцию экспериментальных данных с теоретическими расчетами, что важно для обеспечения безопасности конструкции [18]. Этапы расчета демонстрируют зависимость точности результатов от выбора методов упрощения, адаптации программных ограничений и учета теоретических нагрузок. В данном случае игнорирование конструктивных вырезов допустимо при условии, что их влияние на общую жесткость системы не превышает допустимые погрешности.

Важно отметить, что в рамках стандартных процедур автоматизированного проектирования результаты численного моделирования силовых конструкций и исследования их НДС часто характеризуются неопределенной точностью: разработчики, как правило, не располагают полной информацией о величине ошибки и точности получаемых результатов [2, 7].

Причина незначительного расхождения может быть связана с упрощениями, внесенными

ми в численную модель (например, игнорирование микротрещин, технологических разъемов или нелинейных эффектов), которые в ручных расчетах компенсируются через дополнительные коэффициенты запаса прочности. Однако, учитывая, что отклонение остается в рамках 5 %, это не влияет на конечные выводы о безопасности и жесткости конструкции. На основе этих данных была сформирована аналитическая табл. 2, включающая сравнительные показатели для ключевых параметров [19].

Заключение

Проведенный расчет продемонстрировал эффективность применения программного комплекса «ЛИРА» для оценки НДС днищевой секции судна-снабженца при кантовке. Расчет, основанный на геометрическом упрощении модели и разделении секции на четыре тавровых элемента с индивидуальными характеристиками, позволил достоверно определить критические точки деформаций и нагрузок, что подтверждается совпадением результатов численного моделирования с ручными расчетами в пределах 5 %. Это подтверждает соответствие расчета инженерным стандартам.

Таблица 2. Сводные результаты расчетов

Table 2. Summary of calculation results

Показатель Indicator	Параметры Parameters	
Прогибы Z , мм Sag Z , mm	$Z_{\max} = 0,264$	$Z_{\min} = -1,11$
Напряжения, МПа Stresses, MPa	$\sigma_{\max} = 24,3$	$\tau_{\max} = 49,3$
Изгибающие моменты M , кН · м Bending moments M , kN · m	$M_{y\max} = 62,2$	$M_{y\min} = -129$
Перерезывающие силы Q , кН Shearing forces Q , kN	$Q_{z\max} = 142$	$Q_{z\min} = -97,7$
Моменты сопротивления W , м ³ Moments of resistance W , m ³	$W_{\max} = 0,0064$	$W_{\min} = 0,00579$
Напряжения допускаемые, МПа Permissible stresses, MPa	$\sigma = 235$	$\tau = 135$

Основные выводы по работе:

1. Определение критических зон: максимальная концентрация перерезывающих сил (142 кН) и изгибающих моментов (до 129 кН · м). Это может использоваться для усиления конструкции (при необходимости) в этих участках, например, за счет изменения профиля тавров или введения дополнительных элементов фиксации.

2. Резервы прочности: максимальные напряжения (24,3 МПа) и деформации (1,11 мм) не превышают допустимых значений ($\sigma = 235$ МПа, $\tau = 135$ МПа) [20]. Однако резервы прочности в критических зонах требуют дальнейшего анализа для повышения долговечности.

3. Адаптация программных ограничений: учет модуля упругости через параметр жесткости (EI_y) показал свою эффективность, несмотря на специфику комплекса «ЛИРА», ориентированного на строительные задачи. Это открывает возможности для расширения его применения в судостроении с учетом корректировок.

Результаты расчетов могут быть использованы в следующих целях:

– уточнение схем строповки с учетом распределения нагрузок;

– визуализация деформаций через эпюры напряжений и прогибов для минимизации рисков повреждений на этапе производства;

– рекомендаций по выбору материалов и геометрических параметров для снижения деформаций.

Однако исследование имеет ограничения, связанные с игнорированием конструктивных вырезов и технологических разрывов в модели. Эти упрощения, как показано, не влияют на общие выводы, но требуют учета в дальнейших расчетах для повышения точности.

Перспективы развития:

– внедрение нелинейных моделей для учета микротрещин и динамических эффектов;

– адаптация расчетов для других типов судов и сложных конструкций;

– совершенствование алгоритмов программного комплекса «ЛИРА» для прямого учета модуля упругости в судостроительных задачах.

Таким образом, предложенный расчет обеспечивает полную оценку жесткости конструкций, снижает риски дефектов и затрат на испытания, что соответствует требованиям современного судостроения к безопасности и энергоэффективности.

Список литературы

1. НД 2-030101-045 Руководство по оценке напряженно-деформированного состояния судовых корпусных конструкций на основе метода конечных элементов. Введ. : 2021-05-01. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2021. 11 с.
2. Душевский Д.А., Манухин В.А. Влияние килеватости и конструкции днища на напряженно-деформированное состояние киля при доковании судна // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3-2 (61). С. 47–52.
3. Кулеш В.А. Конструкция корпуса судов в курсовых и выпускных квалификационных работах. Владивосток : ДВФУ, 2018. 61 с.
4. К оптимизации формы и конструкций корпуса судна с системных позиций / В.Г. Бугаев, Дам Ван Тунг, М.В. Китаев и др. // Вестник Инженерной школы Дальневост. федерал. ун-та. 2023. № 4 (57). С. 24–38.
5. Беляева З.В., Кудрявцев С.В. Расчет и проектирование элементов металлических конструкций. Екатеринбург : УрФУ, 2019. 136 с.
6. Окладникова Е.В. Сопротивление материалов. Основы теории, примеры расчета и варианты заданий. Благовещенск : ДальГАУ, 2014. 128 с.
7. Доронин С.В., Рогалев А.Н. Организация вычислительного процесса контроля точности численных оценок напряженно-деформированного состояния // Безопасность и живучесть технических систем : материалы и доклады V Всерос. конф. Красноярск, 2015. Т. 1. С. 163–167.
8. Фролова О.А., Пояркова Е.В. Расчет плоских стержневых конструкций. Оренбург : ОГУ, 2018. 120 с.
9. Остапенко О.Ю. МДК.02.01. Конструкторская подготовка производства в судостроительной организации (раздел 2). Феодосия : филиал Керч. гос. морск. технолог. ун-та, 2021. 22 с.
10. Момент инерции сечения // Inner Engineering : сайт. URL : <https://inner.su/services/moment-inertsii-secheniya/> (дата обращения 19.04.2025).
11. ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Введ. : 1990-01-01. М. : Изд-во стандартов, 1989. 56 с.
12. Мамченко В.О. Расчет балок на прочность и жесткость при прямом плоском изгибе. СПб. : ИТМО, 2014. 48 с.
13. Беликов Г.И. Геометрические характеристики поперечных сечений стержней. Волгоград : ВГАСУ, 2015. 57 с.
14. Козловский А.Э. Расчет элементов конструкций на сдвиг и кручение. Иваново : ИГХТУ, 2016. 100 с.
15. Власов С.В., Грибов К.В. Технология судостроения. Ч. 1. Организация судостроительного производства. Владивосток : ДВФУ, 2016. 167 с.

16. Саруев А.Л., Рудаченко А.В. Исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов. Томск : ТПУ, 2021. 146 с.
17. Ширшиков А.С., Лянденбургский В.В., Белоковылский А.М. Оценка надежности технических систем. Пенза : ПГУАС, 2015. 240 с.
18. Ролле В.Е., Красильников А.А., Комаров И.А. Конструирование и расчет автомобилей и тракторов. Расчет рычагов и шарниров подвески АТС. СПб. : СПбПУ, 2022. 96 с.
19. Гарькин И.Н. Теоретические исследования составных неразрезных подкрановых балок // Региональная архитектура и строительство. 2018. № 2 (35). С. 100–104.
20. Фролов А.М., Иванов А.В. Проектирование конструкций судов внутреннего плавания. Нижний Новгород : ВГАВТ, 2013. 99 с.

References

1. ND 2-030101-045 Rukovodstvo po otsenke napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sudovykh korpusnykh konstrukttsii na osnove metoda konechnykh elementov [ND 2-030101-045 Guidelines for assessing the stress-strain state of ship hull structures based on the finite element method]. Saint Petersburg: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva Publ., 2021. 11 p.
2. Dushevskii D.A., Manukhin V.A. Vliyanie kilevatosti i konstrukttsii dnishcha na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie kilya pri dokovanii sudna [Influence of the bottom keel angle and bottom structure on the stress-strain state of the keel when the ship is docked]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine intellectual technologies], 2023, no 3-2 (61), pp. 47–52.
3. Kulesh V.A. Konstruktsiya korpusa sudov v kursovykh i vypusnykh kvalifikatsionnykh rabotakh [Ship hull design in course and final qualifying papers]. Vladivostok: DVFU Publ., 2018. 61 p.
4. Bugaev V.G., Tung Dam Wan, Kitaev M.V., Novikov V.V. K optimizatsii formy i konstrukttsii korpusa sudna s sistemnykh pozitsii [To optimize the shape and structures of the ship's hull from a systemic perspective]. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University], 2023, no 4 (57), pp. 24-38.
5. Belyaeva Z.V., Kudryavtsev S.V. Raschet i proektirovanie elementov metallicheskh konstrukttsii [Calculation and design of elements of metal structures]. Ekaterinburg: UrFU Publ., 2019. 136 p.
6. Okladnikova E.V. Soprotivlenie materialov. Osnovy teorii, primery rascheta i varianty zadaniy [Resistance of materials. Fundamentals of theory, calculation examples and task options]. Blagoveshchensk: Dal'GAU Publ., 2014. 128 p.
7. Doronin S.V., Rogalev A.N. Organizatsiya vychislitel'nogo protsessa kontrolya tochnosti chislennykh otsenok napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya [Organization of the computational process for controlling the accuracy of numerical estimates of the stress-strain state]. *Materialy i doklady V Vserossiiskoi konferentsii «Bezopasnost' i zhivuchest' tekhnicheskikh sistem»* [Proceedings of the V All-Russian Conference «Safety and survivability of technical systems»]. Krasnoyarsk, 2015, Vol. 1, pp. 163–167.
8. Frolova O.A., Poyarkova E.V. Raschet ploskikh sterzhnevnykh konstrukttsii [Calculation of flat rod structures]. Orenburg: OGU Publ., 2018. 120 p.
9. Ostapenko O.Yu. MDK.02.01. Konstruktorskaya podgotovka proizvodstva v sudostroitel'noi organizatsii (razdel 2) [MDK.02.01. Design preparation of production in a shipbuilding organization (section 2)]. Feodosiya: filial Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2021. 22 p.
10. Moment inertsii secheniya (elektronnyi resurs) [The moment of inertia of the section (electronic resource)]. Available at: <https://inner.su/services/moment-inertsii-secheniya/> (Accessed April 19, 2025).
11. GOST 14249-89 Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost' [State Standard 14249-89 Vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculation]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1989. 56 p.
12. Mamchenko V.O. Raschet balok na prochnost' i zhestkost' pri pryamom ploskom izgibe [Calculation of beams for strength and rigidity in direct flat bending]. Saint Petersburg: ITMO Publ., 2014. 48 p.
13. Belikov G.I. Geometricheskie kharakteristiki poperechnykh sechenii sterzhnei [Geometric characteristics of cross-sections of rods]. Volgograd: VGASU Publ., 2015. 57 p.
14. Kozlovskii A.E. Raschet elementov konstrukttsii na sdvig i kruchenie [Calculation of structural elements for shear and torsion]. Ivanovo: Ivanovskii gosudarstvennyi khimiko-tekhnologicheskii universitet Publ., 2016. 100 p.
15. Vlasov S.V., Gribov K.V. Tekhnologiya sudostroeniya. Ch. 1. Organizatsiya sudostroitel'nogo proizvodstva [Technology of shipbuilding. Part 1. Organization of shipbuilding production]. Vladivostok: DVFU Publ., 2016. 167 p.
16. Saruev A.L., Rudachenko A.V. Issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovodov [Researches of the stress-strain state of pipelines]. Tomsk: TPU Publ., 2021. 146 p.
17. Shirshikov A.S., Lyandenburskii V.V., Belokovyl'skii A.M. Otsenka nadezhnosti tekhnicheskikh sistem [Reliability assessment of technical systems]. Penza: PGUAS Publ., 2015. 240 p.
18. Rolle V.E., Krasil'nikov A.A., Komarov I.A. Konstruirovaniye i raschet avtomobilei i traktorov. Raschet ryuchagov i sharnirov podveski ATS [Design and calculation of cars and tractors. Calculation of the levers and hinges of the ATS suspension]. Saint Petersburg: SPbPU Publ., 2022. 96 p.
19. Gar'kin I.N. Teoreticheskie issledovaniya sostavnykh nerazreznnykh podkranovykh balok [Theoretical researches of composite continuous crane beams]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction], 2018, no 2 (35), pp. 100–104.
20. Frolov A.M., Ivanov A.V. Proektirovaniye konstrukttsii sudov vnutrennego plavaniya [Designing structures of inland navigation vessels]. Nizhny Novgorod: VГАVТ Publ., 2013. 99 p.

Информация об авторах

Гнатив Денис Михайлович, кафедра технологии и организации судостроения и судоремонта, Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток; e-mail: gnatif@bk.ru.

Комаров Артем Сергеевич, кафедра технологии и организации судостроения и судоремонта, Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток; e-mail: joe_vice777@mail.ru.

Арестов Олег Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и организации судостроения и судоремонта, Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток; e-mail: arestov@msun.ru.

Information about the authors

Denis M. Gnativ, Department of Technology and Organization of Shipbuilding and Ship Repair, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevel'skoi, Vladivostok; e-mail: gnatif@bk.ru.

Artem S. Komarov, Department of Technology and Organization of Shipbuilding and Ship Repair, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevel'skoi, Vladivostok; e-mail: joe_vice777@mail.ru.

Oleg V. Arestov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Shipbuilding and Ship Repair, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevel'skoi, Vladivostok; e-mail: arestov@msun.ru.

Сравнительный анализ показателей эффективности в виде рисков при проведении работ по устранению инцидентов информационной безопасности

Ю.М. Краковский✉, В.П. Киргизбаев

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉yuri.krakovskiy@yandex.ru

Резюме

Исследование посвящено сравнительному анализу показателей эффективности в виде рисков при проведении работ по устранению инцидентов информационной безопасности на основе результатов дискретно-имитационного моделирования. Объектом изучения является моделирование экономических аспектов информационной безопасности различных соответствующих систем организаций. Это связано с тем, что защищенность таких информационных систем осуществляется, как правило, при ограниченных финансовых ресурсах. Предметом исследования служит математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для вычисления показателей эффективности в виде рисков, характеризующих защищенность информационных систем организаций. В статье получены развитие предложения авторов, представленные в предыдущих публикациях, а именно: а) по мере необходимости производится оплата работ, связанных с устранением инцидентов (денежный поток по расходам); б) осуществляется накопление платежей в определенном периоде с установленной их стоимостью (денежный поток по доходам). Эти потоки взаимодействуют между собой, создавая результирующий процесс, описывающий состояние фонда в момент времени t . В качестве его математической модели предлагается случайный дискретный нестационарный процесс специального вида. Нестационарность заключается в том, что какая-то доля реализаций данного процесса за время моделирования не пересекает ось времени t , а другая – пересекает. В этом случае вследствие взаимодействия регулярных и случайных денежных потоков проявляется важнейшее свойство сложных систем – эмерджентность. Время, когда в фонде закончились деньги на оплату работ, названо временем его обнуления. В качестве рисков обозначены: однофакторный риск в виде вероятности обнуления фонда; однофакторный финансовый риск в виде математического ожидания случайных величин, связанных с обнулением; два вида двухфакторных финансовых рисков, также сопряженных с обнулением фонда. Предложенное математическое обеспечение и указанные модели рисков реализованы в виде программного обеспечения (разработанного с использованием языка программирования Python), ядром которого является специальная программа на основе дискретно-имитационного моделирования. С помощью созданного программно-математического обеспечения проведен сравнительный анализ отмеченных рисков.

Ключевые слова

информационные системы организаций, моделирующая программа, однофакторные и двухфакторные риски, инциденты информационной безопасности, показатели эффективности

Для цитирования

Краковский Ю.М. Сравнительный анализ показателей эффективности в виде рисков при проведении работ по устранению инцидентов информационной безопасности / Ю.М. Краковский, В.П. Киргизбаев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 131–144. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).131-144.

Информация о статье

поступила в редакцию: 14.05.2025 г.; поступила после рецензирования: 21.05.2025 г.; принята к публикации 22.05.2025 г.

Comparative Analysis of Risk-Based Performance Indicators in Information Security Incident Remediation

Yu.M. Krakovskii✉, V.P. Kirgizbaev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉yuri.krakovskiy@yandex.ru

Abstract

This study presents a comparative analysis of efficiency indicators expressed as risks during incident-response activities in information security, based on results obtained through discrete-event simulation. The research focuses on modelling the economic aspects of information security for a variety of organizational information systems, recognizing that protection is typically implemented under constrained financial resources. It addresses the mathematical, algorithmic and software tools used to calculate risk-based efficiency indicators that characterize an information systems' security posture. Based on the authors' earlier work, the

paper proposes managing a monetary fund that both pays, whenever necessary, for tasks related to incident remediation creating an outflow cash stream and periodically accumulates fixed-amount payments, thereby generating an inflow cash stream. Interaction between these two streams yields a resultant process that describes the fund's state at any moment in time t . This behavior is modelled as a special random, discrete, non-stationary process. Non-stationarity is demonstrated by the fact that, over the simulation horizon, some realizations never cross the time axis while others do. Owing to the interplay between regular and random cash flows, the fund acquires an emergent property typical of complex systems: it exhibits characteristics absent from its individual components when considered in isolation. The instant at which the fund's balance reaches zero is defined as the time of depletion. Several risk metrics related to this event are introduced, namely a single-factor risk that captures the probability of depletion, a single-factor financial risk defined as the expected value of random variables associated with depletion, and two variants of two-factor financial risks that are likewise tied to fund depletion. The proposed mathematical framework and risk models have been implemented in software centered on a discrete-event simulation program written in Python. Using this integrated software-mathematical platform, the study conducts a comparative analysis of the proposed risks and offers both scientific insights and practical recommendations.

Keywords

organizational information systems, simulation program, single-factor and two-factor risks, information security incidents, performance indicators

For citation

Krakovskii Yu.M., Kirgizbaev V.P. Sravnitel'nyi analiz pokazatelei effektivnosti v vide riskov pri provedenii rabot po ustraneniyu intsidentov informatsionnoi bezopasnosti [Comparative Analysis of Risk-Based Performance Indicators in Information Security Incident Remediation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. Vol. 86. No. 2. Pp. 131–144. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).131-144.

Article Info

Received: May 14, 2025; Revised: May 21, 2025; Accepted: May 22, 2025.

Введение

В последние годы в нашей стране большое внимание уделяется цифровизации экономики, внедрению искусственного интеллекта (ИИ) в различные отрасли промышленности. Создается, развивается и внедряется импортозамещающая продукция на основе современных технологий. Все это, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к средствам защиты информации, присутствующим в различных информационных системах организаций (ИСО). Средства информационной безопасности защищают ИСО от широкого диапазона различных угроз с целью обеспечения уверенности в непрерывности бизнеса, минимизации рисков, получения максимальной отдачи от инвестиций [1–3].

Так, в работе [3] подчеркивается, что в условиях глобальной цифровизации объем циркулирующих данных стремительно растет, что повышает вероятность несанкционированного доступа к ним и последующих финансовых, правовых и репутационных потерь для владельцев информационных систем. Авторы отмечают, что, несмотря на совершенствование защитных технологий, число кибератак продолжает увеличиваться, а уязвимости корпоративных и государственных систем остаются значительными. Для повышения устойчивости

информационных систем авторы рекомендуют внедрять непрерывный мониторинг, проводить регулярный анализ угроз и уязвимостей.

К инфраструктуре цифровой экономики относится большое количество новейших информационных и коммуникационных технологий, а именно: облачные вычисления для обеспечения удобного сетевого доступа к вычислительным ресурсам; автоматизация обработки больших данных; технологии распределенных вычислений; программные и аппаратные средства, имитирующие интеллектуальную деятельность человека (ИИ, машинное обучение) и др. [4–6]. Сюда же относятся и вопросы информационной безопасности, которые так или иначе присутствуют во всех современных информационных и коммуникационных технологиях. Это, в частности, выводит проблему информационной безопасности за рамки, к примеру, научной специальности 2.3.6 «Методы и системы защиты информации, информационная безопасность», делая ее, по существу, общезначимой для любых информационных технологий. Общие, системные вопросы информационной безопасности, не связанные с конкретными объектами и средствами, целесообразно рассматривать в рамках специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика». С этих позиций излагается предлагаемый материал.

В данной работе объектом исследования является моделирование экономических аспектов информационной безопасности ИСО. Это связано с тем, что их защищенность осуществляется обычно при ограниченных финансовых ресурсах, поэтому этим аспектам уделяется большое внимание в литературе [2, 7–9].

Также в России актуализуются отрасли, связанные с импортозамещением продукции [10, 11], с отечественными вариантами инновационных технологий и ИИ [12–15]. Такое развитие отраслей промышленности требует внедрения различных мер защиты информации. Обеспечение защищенности ИСО сопряжено с предотвращением инцидентов, которые могут нанести ущерб организации посредством нарушения конфиденциальности, целостности и доступности информации.

Согласно ГОСТ Р 59712–2022, компьютерный инцидент – это факт нарушения и (или) прекращения функционирования информационного ресурса, в том числе произошедший в результате компьютерной атаки. Он является подмножеством инцидентов информационной безопасности (непредвиденное или нежелательное событие, группа событий), характеризующихся подтвержденным фактом нарушения и (или) прекращения функционирования информационного ресурса [2].

Предмет исследования – математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для вычисления показателей эффективности в виде рисков по результатам дискретно-имитационного моделирования, характеризующих защищенность ИСО.

Статья является продолжением публикаций авторов [16–18], в которых предлагается использовать денежный фонд (ДенФ) со следующими функциями:

- по мере необходимости производится оплата работ по устранению инцидентов, когда для каждого вида деятельности определяется периодичность использования фонда (сут.) и стоимость (тыс. руб.) (денежный поток по расходам);

- осуществляется накопление платежей в определенный период (сут.) и с установленной величиной их стоимости (тыс. руб.) (денежный поток по доходам).

Эти потоки взаимодействуют между собой, создавая результирующий процесс, описывающий состояние фонда в момент времени t .

Для моделирования процесса, описывающего состояние этого фонда, предложен имитационный подход, предполагающий создание моделирующей программы с целью получения необходимых выборочных значений, которые затем обрабатываются статистическими методами для вычисления и визуализации предложенных показателей эффективности в виде рисков.

Цель исследования – сравнительный анализ показателей эффективности в виде рисков при проведении работ по устранению инцидентов информационной безопасности на основе результатов дискретно-имитационного моделирования.

Математическая модель для моделирования состояния денежного фонда

В качестве математической модели, описывающей состояние ДенФ, предлагается случайный дискретный нестационарный процесс вида:

$$Fs(t) = F_{S_0} + \sum_{l=1}^L Y_l(t) - \sum_{j=1}^m Z_j(t), \text{ тыс. руб.}, \quad (1)$$

где $Y_l(t)$ – суммарная величина доходов по платежам l -го вида за время t , тыс. руб.; L – число видов платежей по пополнению ДенФ; $Z_j(t)$ – суммарная величина расходов для j -й работы за время t , тыс. руб.; m – число видов работ по устранению инцидентов информационной безопасности; F_{S_0} – начальное значение процесса $Fs(t)$, тыс. руб. [18].

Величину F_{S_0} предлагается задавать в долях от величины средних годовых расходов:

$$F_{S_0} = g \cdot X, \text{ тыс. руб.},$$

где X – средние финансовые средства (тыс. руб.), необходимые для выполнения годового объема всех работ (расходы); g – коэффициент. Учитывая рекомендации теории рисков [19], $g > 0$.

Нестационарность процесса (1) заключается в том, что какая-то доля его реализаций за время моделирования (T_m , сут.) не пересекает ось времени t , а другая – пересекает. В данном случае вследствие взаимодействия регулярных и случайных денежных потоков проявляется важнейшее свойство сложных систем, называемое эмерджентностью [20] (появление у системы свойств, которые отсутствуют у ее компонентов вследствие их взаимодействия).

Модели показателей эффективности в виде рисков

Введем важнейшее понятие данной работы, а именно – время обнуления ДенФ. Для этого нам понадобится время, когда в фонде закончились деньги на оплату работ s (сут.). Оно и будет временем обнуления ДенФ. Введем случайную величину S , для которой определяется время s . Тогда $(S < S_i)$ – негативное случайное событие, заключающееся в том, что обнуление ДенФ произошло на интервале $(0, S_i)$, сут.

Время обнуления возникает в связи с тем, что случайный процесс (1), характеризующий состояние ДенФ, является нестационарным, поэтому некоторые реализации процесса пересекают ось времени (значение реализации процесса в момент времени s становится отрицательным). Для таких процессов вероятность $P(S < \infty) < 1$.

Рассмотрим два варианта технологии определения времени обнуления ДенФ:

Вариант А: s – время, когда первый раз значение $Fs(t) < 0$ (произошло обнуление ДенФ), процесс моделирования реализации процесса (1) прекращается:

$$s = \min_i (t: Fs(t) < 0), \text{ сут.} \quad (2)$$

При имитационном моделировании с помощью созданной моделирующей программы для времени s образуется упорядоченная по возрастанию выборка объема n :

$$T_s = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_n), \quad (3)$$

где i – номер элемента выборки (номер реализации процесса (1), для которой произошло обнуление ДенФ).

Вариант В, когда выполнилось условие (2) и до конца месяца даже при поступлении каких-то платежей значение $Fs(t) < 0$, то считаем, что в момент времени (2) произошло обнуление ДенФ. Формируется выборка (3), процесс моделирования реализации (1) прекращается (рис. 1).

Если до конца месяца за счет поступлений значение функции $Fs(t)$ стало больше нуля, то величину s не учитываем (обнуление ДенФ не произошло). Моделирование реализации процесса (1) продолжается. Для варианта В предполагается, что оплату работ можно осуществлять с задержкой, но оплата должна произойти в течение текущего месяца за счет поступлений.

Вероятность обнуления ДенФ до времени S_i :

$$p_i = P(S < S_i), \quad (4)$$

предлагается в качестве показателя эффективности (в теории рисков величина (4) – это однофакторная модель риска).

Необходимо так организовать поступление денежных платежей в фонд, чтобы при появлении инцидентов информационной безопасности и проведения работ по их устранению однофакторный риск (4) был минимален.

При имитационном моделировании показатель (4) заменяется на точечную (\hat{R}_τ) и интервальную (τ_1, τ_2) оценки:

$$\hat{R}_\tau = k_\tau / n_0, \quad (5)$$

где k_τ – число реализаций процесса (1), для которых создается точечная оценка (5); n_0 – число моделируемых реализаций процесса (1).

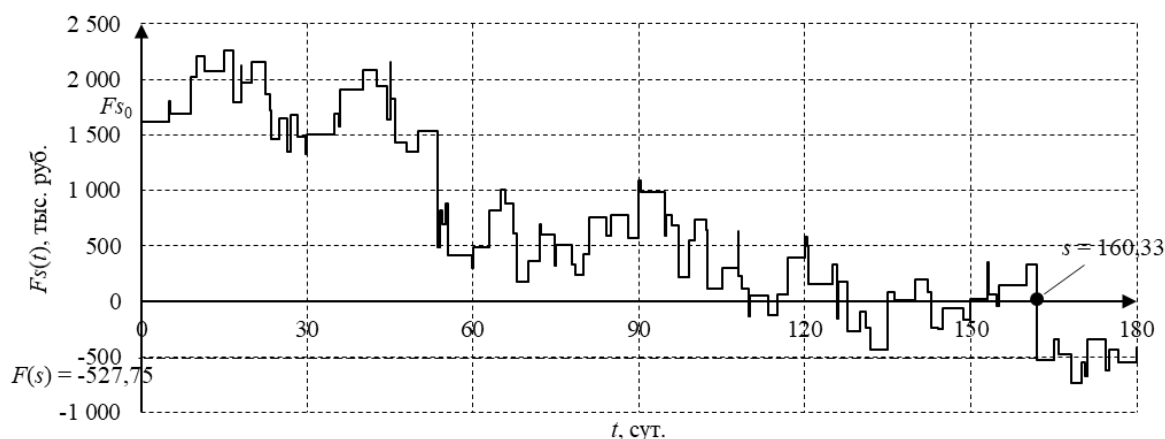


Рис. 1. График реализации с «обнулением» денежного фонда при технологии определения времени обнуления В

Fig. 1. Graph of the implementation with «zeroing» of the monetary fund under «zeroing» determination technology B

Это значение должно обеспечить необходимую точность моделирования. Определение интервальной оценки (τ_1 , τ_2) можно посмотреть в [16].

Приведем показатели эффективности в виде однофакторных финансовых рисков, которые измеряются в рублях:

1. Финансовый риск по расходам –

$$RD = M[Dr], \text{ тыс. руб.}, \quad (6)$$

где Dr – случайная величина, характеризующая итоговые расходы фонда до времени его обнуления; $M[Dr]$ – математическое ожидание этой величины.

2. Финансовый риск по поступлениям –

$$RU = M[Du], \text{ тыс. руб.}, \quad (7)$$

где Du – случайная величина, характеризующая итоговые поступления в фонд до времени его обнуления; $M[Du]$ – математическое ожидание этой величины [17].

При имитационном моделировании риски (6) и (7) заменим на точечные и интервальные оценки. Точечная оценка величины (6), характеризующая средние расходы на интервале (0, S_t):

$$RD_0 = \sum_{i=1}^{k_\tau} d_i / k_\tau, \quad (8)$$

где d_i – значение расходов по всем работам до времени s_i :

$$d_i = \sum_{j=1}^m Z_j(s_i), \quad (9)$$

где $Z_j(s_i)$ – величина из модели (1).

Точечная оценка величины (7), характеризующая средние поступления на интервале (0, S_t):

$$RU_0 = \sum_{i=1}^{k_\tau} u_i / k_\tau, \quad (10)$$

где u_i – значение поступлений по всем видам платежей до времени s_i :

$$u_i = F_{S_0} + \sum_{l=1}^L Y_l(s_i),$$

где $Y_l(s_i)$ – величина из модели (1).

Определение интервальных оценок рисков (6) и (7) можно посмотреть в [17].

Следует отметить, что разность между точечными оценками рисков (8) и (10) равна:

$$RD_0 - RU_0 = - \sum_{i=1}^{k_\tau} F_s(s_i) / k_\tau, \quad (11)$$

где $F_s(s_i)$ – значение процесса (1) в момент обнуления ДенФ; s_i – выборочное значение (3).

Так как значения $F_s(s_i)$ отрицательные (см. рис. 1), то перед суммой стоит знак минус. Подчеркнем, что формула (11) справедлива для обеих технологий обнуления фонда.

Из нее вытекает, что точечные оценки финансовых рисков (8) и (10) дублируют друг друга, значение RD_0 всегда больше значения RU_0 на правую часть (11). Авторы рекомендуют использовать из этих двух однофакторных финансовых рисков финансовый риск по расходам (6), потому что именно расходы связаны с оплатой работ по устранению инцидентов и событий информационной безопасности.

Для оценки эффективности работ по устранению инцидентов помимо однофакторных финансовых рисков предложены двухфакторные риски двух видов. Рассмотрим первый вид:

$$RD2 = M[p_0 \cdot Dr], \text{ тыс. руб.}; \quad (12)$$

$$RU2 = M[p_0 \cdot Du], \text{ тыс. руб.} \quad (13)$$

Здесь p_0 – вероятность обнуления ДенФ до времени s_i (4); Dr и Du – случайные величины, описанные ранее; $M[\cdot]$ – математическое ожидание произведения величин.

Учитывая изложенную рекомендацию, будем рассматривать риск (12) (экспериментально показано, что риски (12) и (13) дублируют друг друга).

Введем выборку Q оценок вероятности p_0 (q_i) для i -й реализации процесса (1) после упорядочивания по возрастанию выборки (3):

$$Q = (q_1, \dots, q_i, \dots, q_n), q_i = i / n_0. \quad (14)$$

Среднее значение оценки вероятности p_0 на интервале (0, S_t) равно:

$$q_0 = \sum_{i=1}^{k_\tau} q_i / k_\tau = (k_\tau + 1) / (2 \cdot n_0).$$

Введем дополнительно выборку:

$$D2 = (q_1 \cdot d_1, \dots, q_i \cdot d_i, \dots, q_n \cdot d_n).$$

Здесь d_i – величина (10); q_i – величина (14).

При имитационном моделировании риск (12) заменим на точечную и интервальную оценки: $RD2_0$ – точечная оценка величины $RD2$ на интервале (0, S_t):

$$RD2_0 = \sum_{i=1}^{k_\tau} q_i \cdot d_i / k_\tau. \quad (15)$$

Определение интервальной оценки величины (12) можно посмотреть в [18].

Рассмотрим второй вид двухфакторных финансовых рисков на примере расходов:

$$PD0 = p_0 \cdot RD, \quad (16)$$

где p_0 и RD – величины (4) и (6) соответственно.

Подчеркнем, что финансовый риск (12) – это математическое ожидание произведения этих величин, а риск (16) – произведение вероятности обнуления на математическое ожидание.

При имитационном моделировании риск (16) заменим на точечную и интервальную оценки: RPD_0 – точечная оценка величины PD_0 на интервале $(0, S_i)$:

$$RPD_0 = \tilde{R}_\tau \cdot RD_0 = \sum_{i=1}^{k_\tau} d_i / n_0. \quad (17)$$

где \tilde{R}_τ , RD_0 – величины (5) и (8); (RPD_1, RPD_2) – интервальная оценка величины PD_0 [21]:

$$RPD_\Delta = z_\gamma \sqrt{(\tilde{R}_\tau \cdot \sigma_d^2 + \tilde{R}_\tau \cdot (1 - \tilde{R}_\tau) \cdot RD_0^2) / n_0}, \quad (18)$$

$$RPD_1 = RPD_0 - RPD_\Delta, \quad (19)$$

$$RPD_2 = RPD_0 + RPD_\Delta, \quad (20)$$

где σ_d – оценка среднеквадратического отклонения величины Dr на интервале $(0, S_i)$; $z_\gamma = 1,96$ – критическое значение (квантиль) статистики Z (нормированное нормальное распределение) при доверительной вероятности $\gamma = 0,95$.

Чтобы обосновано использовать формулы для доверительных интервалов (интервальной оценки) (18)–(20), надо показать, что случайная величина PD_0 имеет нормальный закон. Именно в этом случае можно использовать в формулах квантиль z_γ . Для этого необходимо создать по величине (17) выборочные значения. Эти значения для примера найдем при $g = 0,04$ и $S_i = 365$ сут., для чего проведем 1 000 моделирований при разных начальных значениях генератора случайных чисел (каждое моделирование требует создания 20 000 реализаций процесса (1)).

Полученная гистограмма плотности распределения вероятностей с наложенной кривой нормального распределения приведена на рис. 2.

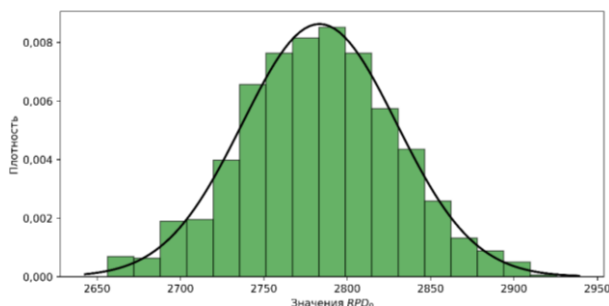


Рис. 2. Гистограмма плотности распределения с кривой нормального распределения для PD_0

Fig. 2. Probability density histogram with a normal distribution curve for PD_0

Сформулируем нулевую и альтернативную гипотезы для проверки распределения этой величины. Нулевая гипотеза (H_0): генеральная совокупность значений величины PD_0 имеет нормальное распределение. Альтернативная гипотеза (H_1): генеральная совокупность значений величины PD_0 не имеет нормальное распределение.

Для проверки этих гипотез применим статистический тест Шапиро – Уилка [22], уровень значимости $\alpha = 0,05$. Получены следующие результаты: значение статистики $W = 0,9982$; $p = 0,3888$. Данные значения получены с использованием функции `shapiro` из подмодуля `scipy.stats` библиотеки `SciPy` языка программирования `Python`.

Так как $p > 0,05$, то нулевую гипотезу (H_0) можно принять. Таким образом, экспериментально показано, что в формуле (18) можно использовать квантиль z_γ .

Апробация созданного математического и программного обеспечения

Предложенное математическое обеспечение и сценарии рисков реализованы в виде программного обеспечения, ядром которого является программа, созданная на основе дискретно-имитационного моделирования [23]. Программное обеспечение разработано с использованием языка программирования `Python` [24].

Апробацию проведем для пяти видов работ ($m = 5$), приведенных в статье [17]. Исходные данные для описания вероятностных моделей, необходимых для моделирования затрат на выполнение работ, возьмем из статьи [18] (табл. 1). Учитывались следующие показатели:

1. Вероятностные модели для интервалов (Н, Б, Рв) и вероятностные модели для затрат (Лн, Б-С, П, Г), где «Н» – нормальное распределение; «Б» – бета-распределение; «Рв» – равномерное распределение; «Лн» – логнормальное распределение; «Б-С» – распределение Бирнбаума-Саундерса; «П» – распределение Парето с нулевой точкой; «Г» – гамма-распределение (возможно изменение этих моделей).

2. mt , mz – значения математические ожидания соответственно для интервалов и затрат, а kvt , kvz – коэффициенты вариации для интервалов и затрат (табл. 1).

Для значений из табл. 1 общие средние расходы, необходимые для выполнения годового объема всех работ, равны $X = 26\,931,26$ тыс. руб.

В табл. 2 и 3 приведены результаты моделирования показателей эффективности для двух вариантов поступления платежей (V). Значения показателей (4), (12) и (16) для хорошего варианта должны быть минимальными, а значения показателя (7) – максимальными. Также приведем относительные погрешности в процентах (21)–(24):

$$\Delta_{\tau} = (\tau_2 - \tau_1) \cdot 100 / (2 \cdot \tilde{R}_{\tau}), \quad (21)$$

$$\Delta_{RD} = (RD_2 - RD_1) \cdot 100 / (2 \cdot RD_0), \quad (22)$$

$$\Delta_{RD2} = (RD2_2 - RD2_1) \cdot 100 / (2 \cdot RD2_0), \quad (23)$$

$$\Delta_{RPD} = (RPD_2 - RPD_1) \cdot 100 / (2 \cdot RPD_0). \quad (24)$$

Из табл. 2 и 3 видно, что вариант $F1$ с точки зрения показателей эффективности предпочтительнее варианта $F2$, так как доверительные интервалы этих показателей почти нигде не пересекаются (исключение составляет незначительное пересечение для показателя (6) при $S_i = 91$ сут.).

В данной статье при апробации рассматриваются два вида платежей ($L = 2$), когда доли платежей $c_1 = 0,5$, $c_2 = 0,5$. Исследуются два варианта:

1. $F1$, когда интервалы времени между платежами $h_1 = 5$ сут. и $h_2 = 9$ сут., соответственно значения единичных платежей $Y_{01} = 184,46$ тыс. руб. и $Y_{02} = 332,03$ тыс. руб.

2. $F2$, когда интервал времени между платежами $h_1 = 7$ сут. и $h_2 = 11$ сут., а значения единичных платежей $Y_{01} = 258,24$ тыс. руб. и $Y_{02} = 405,81$ тыс. руб.

Будем использовать вариант В технологии определения времени обнуления ДенФ. Начальное значение F_{S_0} вычисляется при $g = 0,02$. Число реализаций при моделировании равно 100 000.

Таблица 1. Вероятностные модели и их числовые характеристики

Table 1. Probabilistic models and their numerical characteristics

Показатели Indicators	Значения математических ожиданий и коэффициентов вариации в соответствии с номером работы Values of mathematical expectations and coefficients of variation according to the work number				
	1	2	3	4	5
Вероятностные модели для интервалов Probability models for intervals	Н	Б	Рв	Б	Н
mt_{ij} , сут.	18,0	24,0	28,0	6,0	22,0
kv_{tj}	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10
Вероятностные модели для затрат Probabilistic models for costs	Лн	Б-С	П	Лн	Г
mz_{ij} , тыс. р.	380,0	340,0	200,0	120,0	250,0
kvz_{ij}	0,15	0,20	1,25	0,25	0,15

Таблица 2. Результаты моделирования для показателей (4) и (6)

Table 2. Simulation results for indicators (4) and (6)

V	S_i , сут.	k_{τ}	\tilde{R}_{τ}	τ_1	τ_2	Δ_{τ} , %	RD_0	RD_1	RD_2	Δ_{RD} , %
$F1$	91	4 719	0,0472	0,0461	0,0483	2,3479	5 009,32	4 963,54	5 055,09	0,91
	182	13 078	0,1308	0,1290	0,1325	1,3448	8 742,13	8 686,54	8 797,71	0,64
	273	19 975	0,1998	0,1977	0,2018	1,0436	11 790,10	11 720,07	11 860,13	0,59
	365	25 676	0,2568	0,2545	0,2590	0,8869	14 533,08	14 449,40	14 616,75	0,58
$F2$	91	8 480	0,0848	0,0834	0,0863	1,7147	4 927,11	4 888,32	4 965,91	0,79
	182	20 894	0,2089	0,2068	0,2111	1,0145	8 388,39	8 342,23	8 434,56	0,55
	273	28 858	0,2886	0,2862	0,2909	0,8184	11 135,19	11 073,23	11 197,15	0,56
	365	34 710	0,3471	0,3446	0,3496	0,7148	13 454,2	13 378,91	13 529,48	0,56

Таблица 3. Результаты моделирования для показателей (12) и (16)

Table 3. Simulation results for indicators (12) and (16)

V	S_t , сут.	k_τ	$RD2_0$	$RD2_1$	$RD2_2$	Δ_{RD2} , %	RPD_0	RPD_1	RPD_2	Δ_{RPD} , %
$F1$	91	4 719	138,17	135,14	141,19	2,19	236,39	229,46	243,32	2,93
	182	13 078	690,59	681,49	699,69	1,32	1 143,30	1 123,63	1 162,96	1,72
	273	19 975	1 465,81	1 449,06	1 482,56	1,14	2 355,07	2 322,68	2 387,47	1,38
	365	25 676	2 369,64	2 344,80	2 394,49	1,05	3 731,51	3 686,68	3 776,35	1,20
$F2$	91	8 480	250,61	246,46	254,76	1,66	417,82	408,70	426,94	2,18
	182	20 894	1 077,11	1 065,41	1 088,81	1,09	1 752,67	1 729,44	1 775,91	1,33
	273	28 858	2 047,97	2 027,39	2 068,55	1,00	3 213,39	3 177,37	3 249,42	1,12
	365	34 710	3 041,91	3 012,71	3 071,10	0,96	4 669,95	4 622,42	4 717,48	1,02

Относительные погрешности вычисления точечных оценок для показателей достаточно небольшие (меньше 2 %, кроме случаев при $S_t = 91$ сут.). При этом для варианта $F1$ погрешность немного больше, чем для $F2$. Это связано с тем, что для «хорошего» варианта ($F1$) объем выборки (k_τ) меньше.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что интервалы времени между поступлениями желательны уменьшать.

Риски (12) и (16) дублируют друг друга, при этом риск (16) больше риска (12). Найдем разность их точечных оценок:

$$RPD_0 - RD2_0 = \sum_{i=1}^{k_\tau} (1 - i/k_\tau) d_i / n_0 > 0. \quad (25)$$

Это связано с тем, что $d_i > 0$ и $(1 - i/k_\tau) > 0$ (при $k_\tau \geq 2$).

Из (25) вытекает, что при выборе показателей эффективности (среди двухфакторных финансовых рисков) для сравнения вариантов поступления платежей можно взять любой из них. Авторы рекомендуют риск (12), так как для него проще найти доверительный интервал.

Рассмотрим зависимости показателей эффективности от коэффициента g для варианта $F1$, обнуление по варианту B .

Зависимости $\tilde{R}_\tau(g)$ от g

Проведем аппроксимацию экспериментальных значений $\tilde{R}_\tau(g)$ (5), полученных имитационным моделированием, функцией вида:

$$y_{\tilde{R}_\tau}(g) = A \cdot e^{-a \cdot g}. \quad (26)$$

Отметим, что для нее $y_{\tilde{R}_\tau}(0) = A$.

На рис. 3 и 4 приведены экспериментальные значения и графики функций (26), которые их аппроксимируют для различных S_t .

При $S_t = 182$ сут. получены следующие значения параметров: $A = 0,3764$; $a = 52,9243$; коэффициент детерминации 0,9999. При $S_t =$

365 сут.: $A = 0,5309$; $a = 37,1426$; коэффициент детерминации 0,9994. Как видим, наблюдается хорошая точность аппроксимации для обоих случаев.

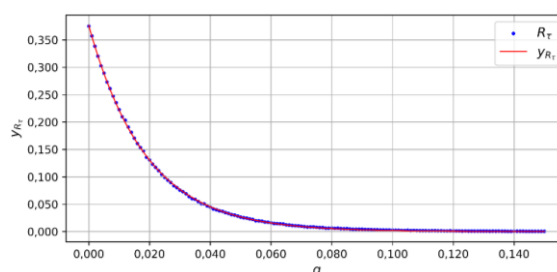


Рис. 3. Аппроксимация $\tilde{R}_\tau(g)$ функцией (26) для $S_t = 182$ сут.

Fig. 3. Approximation of $\tilde{R}_\tau(g)$ with function (26) for $S_t = 182$ days

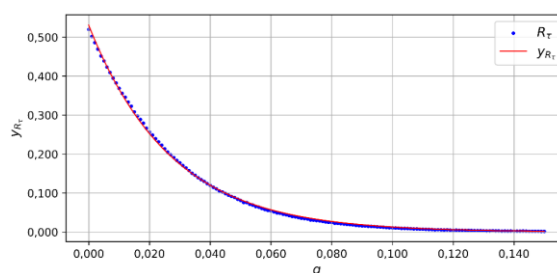


Рис. 4. Аппроксимация $\tilde{R}_\tau(g)$ функцией (30) для $S_t = 365$ сут.

Fig. 4. Approximation of $\tilde{R}_\tau(g)$ with function (30) for $S_t = 365$ days

Значения функции $y_{\tilde{R}_\tau}(0)$ на рисунках соответствуют значениям коэффициента A .

По функции (26) можно определять значение g_m , когда эта функция равна r_m – заданному уровню вероятности. Это значение можно использовать как максимальное при построении других аппроксимационных зависимостей.

Из уравнения (27)

$$A \cdot e^{-a \cdot g_m} = r_m \quad (27)$$

получим:

$$g_m = \ln(A/r_m)/a. \quad (28)$$

Пусть $r_m = 0,1$, тогда, используя (28), при $S_t = 182$ сут. $g_m = 0,025$; при $S_t = 365$ сут. $g_m = 0,045$. Эти значения показывают, что для нормального функционирования ДенФ совсем не обязательно использовать большое начальное значение F_{S_0} .

Зависимости RD_0 от g

Проведем аппроксимацию экспериментальных значений $RD_0(g)$ (8), полученных имитационным моделированием, функцией вида:

$$y_{RD_0}(g) = A \cdot \ln(g + a) + b. \quad (29)$$

Отметим, что для нее $y_{RD_0}(0) = A \cdot \ln(a + b)$.

На рис. 5 и 6 приведены экспериментальные значения и графики функций (33), которые их аппроксимируют для различных S_t .

При $S_t = 182$ сут. получены следующие значения параметров: $A = 2\,726,22$; $a = 0,0155$; $b = 17\,849,66$; $y_{RD_0}(0) = 6\,489,73$ (соответствует значению на рис. 5); коэффициент детерминации 0,9995. При $S_t = 365$ сут.: $A = 6\,476,59$; $a = 0,0200$; $b = 35\,419,88$; $y_{RD_0}(0) = 10\,083,31$ (соответствует значению на рис. 6); коэффициент детерминации 0,9995. Как видим, наблюдается хорошая точность аппроксимации для обоих случаев.

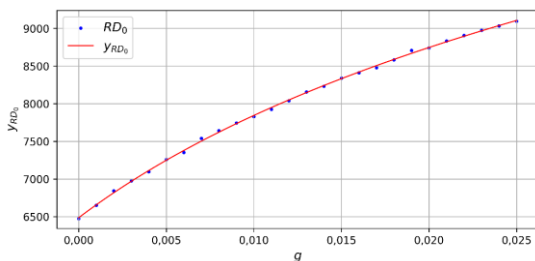


Рис. 5. Аппроксимация $RD_0(g)$ функцией (29) для $S_t = 182$ сут.

Fig. 5. Approximation of $RD_0(g)$ with function (29) for $S_t = 182$ days

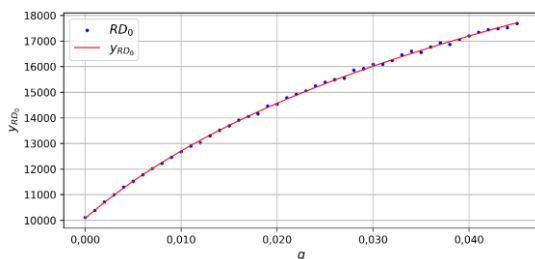


Рис. 6. Аппроксимация $RD_0(g)$ функцией (29) для $S_t = 365$ сут.

Fig. 6. Approximation of $RD_0(g)$ with function (29) for $S_t = 365$ days

Зависимости RD_{20} от g

Проведем аппроксимацию экспериментальных значений $RD_{20}(g)$ (15), полученных имитационным моделированием, функцией вида:

$$y(g) = A \cdot (g + b) \cdot e^{-a \cdot g}. \quad (30)$$

Отметим, что для нее $y(0) = A \cdot b$.

На рис. 7 и 8 приведены экспериментальные значения и графики функций (30), которые их аппроксимируют для различных S_t .

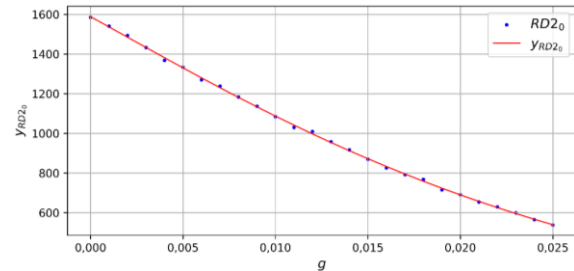


Рис. 7. Аппроксимация $RD_{20}(g)$ функцией (30) для $S_t = 182$ сут.

Fig. 7. Approximation of $RD_{20}(g)$ with function (30) for $S_t = 182$ days

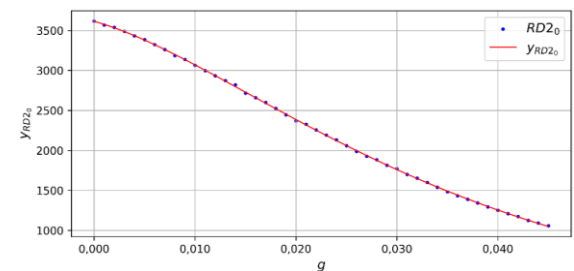


Рис. 8. Аппроксимация $RD_{20}(g)$ функцией (30) для $S_t = 365$ сут.

Fig. 8. Approximation of $RD_{20}(g)$ with function (30) for $S_t = 365$ days

При $S_t = 182$ сут. получены следующие значения параметров: $A = 58\,747,94$; $a = 69,3903$; $b = 0,0270$; $y_{RD_{20}}(0) = 1\,586,19$ (соответствует значению на рис. 7); коэффициент детерминации 0,9996. При $S_t = 365$ сут.: $A = 148\,478,85$; $a = 50,7476$; $b = 0,0243$; $y_{RD_{20}}(0) = 3\,608,04$ (соответствует значению на рис. 8); коэффициент детерминации 0,9999. Как видим, наблюдается хорошая точность аппроксимации для обоих случаев.

Зависимости RPD_0 от g

Проведем аппроксимацию экспериментальных значений $RPD_0(g)$ (17), полученных имитационным моделированием, функцией (30).

На рис. 9 и 10 приведены экспериментальные значения и графики функций (30), которые их аппроксимируют для различных S_t .

При $S_t = 182$ сут. получены следующие значения параметров: $A = 105\,192,12$; $a = 68,9911$; $b = 0,0231$; $y_{RPD_0}(0) = 2\,429,94$ (соответствует значению на рис. 9); коэффициент детерминации 0,9995. При $S_t = 365$ сут.: $A = 246\,767,67$; $a = 49,8234$; $b = 0,0213$; $y_{RPD_0}(0) = 5\,256,15$ (соответствует значению на рис. 10); коэффициент детерминации 0,9999. Как видим, наблюдается хорошая точность аппроксимации для обоих случаев.

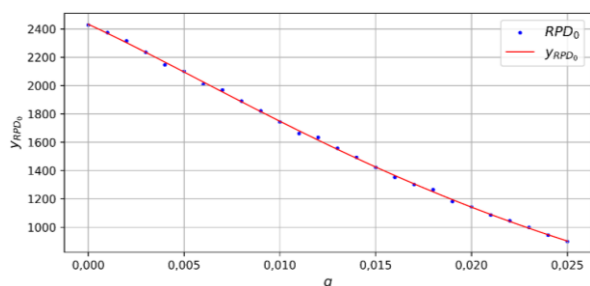


Рис. 9. Аппроксимация $RPD_0(g)$ функцией (30) для $S_t = 182$ сут.

Fig. 9. Approximation of $RPD_0(g)$ with function (30) for $S_t = 182$ days

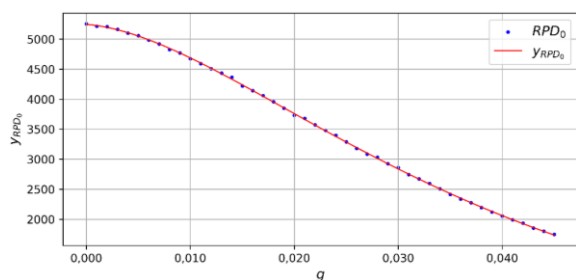


Рис. 10. Аппроксимация $RPD_0(g)$ функцией (30) для $S_t = 365$ сут.

Fig. 10. Approximation of $RPD_0(g)$ with function (30) for $S_t = 365$ days

Зависимости $RD2_0$ и RPD_0 от g при обнулении по варианту А

Проведем аппроксимацию экспериментальных значений $RD2_0(g)$ (15) и $RPD_0(g)$ (17), полученных имитационным моделированием, функцией (30) для варианта исходных данных F1 при обнулении по варианту А.

На рис. 11–14 приведены экспериментальные значения и графики функций (30), которые их аппроксимируют для различных S_t .

Для $RD2_0(g)$ при $S_t = 182$ сут. получены следующие значения параметров: $A = 251\,185,67$; $a = 73,2431$; $b = 0,0062$; $y_{RD2_0}(0) = 1\,547,55$ (соответствует значению на рис. 11); коэффициент детерминации 0,9995. При $S_t = 365$ сут.: $A = 390\,551,78$; $a = 50,7908$; $b = 0,0060$; $y_{RD2_0}(0) =$

2 339,97 (соответствует значению на рис. 12); коэффициент детерминации 0,9988.

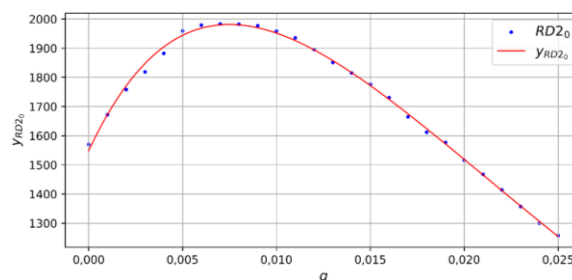


Рис. 11. Аппроксимация $RD2_0(g)$ функцией (30) для $S_t = 182$ сут. (по варианту А)

Fig. 11. Approximation of $RD2_0(g)$ with function (30) for $S_t = 182$ days (according to possibility A)

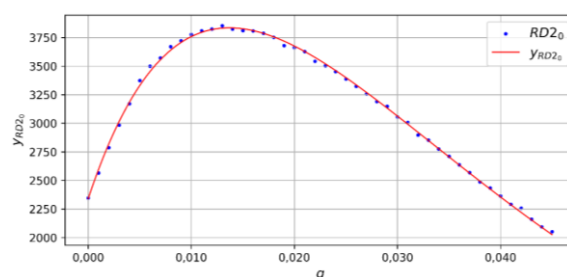


Рис. 12. Аппроксимация $RD2_0(g)$ функцией (30) для $S_t = 365$ сут. (по варианту А)

Fig. 12. Approximation of $RD2_0(g)$ with function (30) for $S_t = 365$ days (according to possibility A)

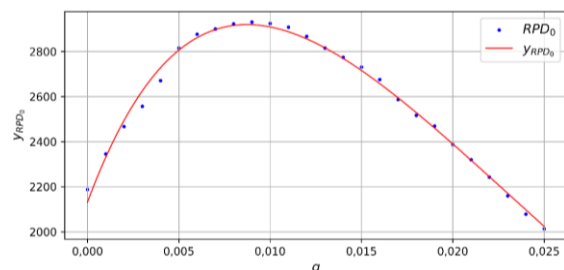


Рис. 13. Аппроксимация $RPD_0(g)$ функцией (30) для $S_t = 182$ сут.

Fig. 13. Approximation of $RPD_0(g)$ with function (30) for $S_t = 182$ days

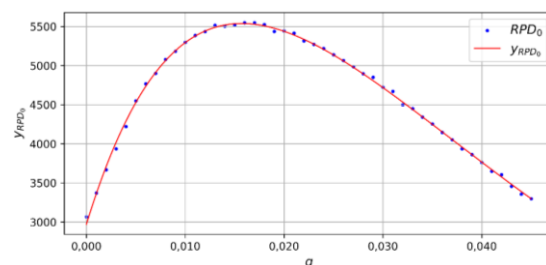


Рис. 14. Аппроксимация $RPD_0(g)$ функцией (30) для $S_t = 365$ сут.

Fig. 14. Approximation of $RPD_0(g)$ with function (30) for $S_t = 365$ days

Для $RPD_0(g)$ при $S_t = 182$ сут. получены следующие значения параметров: $A = 364\,503,36$; $a = 68,5914$; $b = 0,0058$; $y_{RPD_0}(0) = 2\,131,11$ (соответствует значению на рис. 13); коэффициент детерминации 0,9931. При $S_t = 365$ сут.: $A = 553\,670,01$; $a = 47,4413$; $b = 0,0054$; $y_{RPD_0}(0) = 2\,970,95$ (соответствует значению на рис. 14); коэффициент детерминации 0,9985. Как видим, наблюдается хорошая точность аппроксимации для всех четырех случаев.

Из рис. 11–14 видно, что, в отличие от обнуления по варианту В для двухфакторных финансовых рисков, при обнулении по варианту А наблюдается экстремум (максимум), для функции (30) ее экстремум находится в точке:

$$g_0 = 1/a - b. \quad (31)$$

Для $RD_{20}(g)$ при $S_t = 182$ сут. $g_0 = 0,0075$; при $S_t = 365$ сут. $g_0 = 0,0137$; для $RPD_0(g)$ при $S_t = 182$ сут. $g_0 = 0,0087$; при $S_t = 365$ сут. $g_0 = 0,0157$. Все значения соответствуют графикам функции на рис. 11–14.

В табл. 4 приведены экспериментальные значения точечных оценок показателей эффективности при $S_t = 365$ сут. в области максимума двухфакторных рисков.

По данным табл. 4 можно сделать вывод, что «перегиб» (наличие максимума) у двухфакторных рисков возникает из-за того, что скорость уменьшения значений $\tilde{R}_r(g)$ и скорость увеличения значений $RD_0(g)$ до экстремума и после него разные. В связи с этим, точечные оценки (15) и (17) сначала возрастают, а затем убывают.

Учитывая формулу (17), величина $RPD_0(g)$ – произведение величин $\tilde{R}_r(g)$ и $RD_0(g)$, которое равно сумме величин (9), деленной на n_0 . Величина (15) – это сумма взвешенных величин (9), поэтому она меньше $RPD_0(g)$ на правую часть в (25). В связи с этим точка экстремума (31) для величины (15) меньше, чем для (17): в нашем случае 0,0137 и 0,0157.

Отметим, что это достаточно небольшие значения, они меньше рекомендуемых значений (28). При $S_t < 365$ сут. эти значения еще меньше. Необходимо также подчеркнуть, что

экстремумы для экспериментальных и расчетных значений по аппроксимирующим функциям немного отличаются.

Заключение

1. Развивая предыдущие свои исследования [16–18], авторы уточнили важное свойство денежного фонда и его функций, а именно: понятие времени его обнуления. Описаны два варианта технологии обнуления (А и В).

2. В качестве рисков предложены: однофакторный риск в виде вероятности обнуления фонда; однофакторный финансовый риск в виде математического ожидания случайных величин, связанных с обнулением; два вида двухфакторных финансовых рисков, также связанных с обнулением фонда. Проведен их сравнительный анализ.

3. Доказано, что однофакторные финансовые риски в виде математического ожидания случайных величин, характеризующие итоговые расходы фонда (риск по расходам) и итоговые поступления в фонд (риск по доходам), дублируют друг друга. Рекомендовано использовать один из них, а именно – риск по расходам. Эта рекомендация относится к обеим технологиям обнуления.

4. Доказано, что предложенные два вида двухфакторных финансовых рисков (12) и (16) также дублируют друг друга. Рекомендовано использовать один из них, а именно риск (12) (математическое ожидание произведения вероятности обнуления фонда на случайную величину, характеризующую итоговые расходы фонда).

5. Проведена аппроксимация точечных оценок предложенных рисков различными функциями – (26), (29) и (30) в зависимости от коэффициента g . Задав уровень вероятности r_m , можно по зависимости (26) определить максимальное значение этого коэффициента по формуле (28). Оказывается, что для нормального функционирования ДенФ совсем не обязательно использовать большое начальное значение F_{S_0} .

Таблица 4. Экспериментальные значения показателей эффективности $RD_{20}(g)$ и $RPD_0(g)$ возле экстремумов при $S_t = 365$ сут.

Table 4. Experimental values of the efficiency indicators near the extrema of $RD_{20}(g)$ and $RPD_0(g)$ at $S_t = 365$ days

g	0,005	0,010	0,013	0,015	0,020	0,025
$\tilde{R}_r(g)$	0,7750	0,6654	0,6088	0,5709	0,4886	0,4148
$RD_0(g)$	5 870,49	7 960,38	9 057,55	9 660,32	11 140,74	12 387,21
$RD_{20}(g)$	3 374,59	3 776,73	3 854,18	3 810,48	3 661,86	3 386,73
$RPD_0(g)$	4 549,51	5 297,08	5 514,15	5 515,27	5 443,03	5 138,71

6. Показано, что при аппроксимации точечных оценок рисков (12) и (16) функцией (30) при обнулении фонда по технологии А наблюдается экстремум, аргумент которого можно определить по формуле (31). Это связано с тем, что

точечные оценки (15) и (17) сначала возрастают, а затем убывают. При использовании технологии В этот эффект отсутствует (функции монотонно убывают).

Список литературы

1. Кондауров С.Н., Бунина А.В., Митрофанов А.В. Проблемы обеспечения информационной безопасности в корпоративных сетях // Современные информационные технологии и информационная безопасность : сб. науч. ст. III Всерос. науч.-техн. конф. Курск, 2024. С. 69–72.
2. Краковский Ю.М. Методы защиты информации. Санкт-Петербург : Лань, 2021. 236 с.
3. Шпак А.А. Современные угрозы информационной безопасности // Современное право. 2024. № 1. С. 106–108.
4. Ершова Т.В., Хохлов Ю.Е. Цифровая экономика: от теоретических концепций к российской практике // Журнал Новой экономической ассоциации. 2025. № 2 (67). С. 234–243.
5. Цифровые технологии в российской экономике / К.О. Вишневецкий, Л.М. Гохберг, В.В. Дементьев и др. М. : НИУ ВШЭ, 2021. 116 с.
6. Стародубова А.А., Исакова Д.Д. Инновационные стратегии цифровых предприятий для достижения устойчивого развития в регионах // π-Economy. 2023. Т. 16. № 1. С. 39–50.
7. Оганесян Л.Л., Козырь Н.С. Проектное управление в информационной безопасности // Вестник Академии знаний. 2023. № 4 (57). С. 207–209.
8. Сизов В.А., Дрожкин А.А. Моделирование экономики информационной безопасности субъекта экономической деятельности на основе симплекс-метода // Вестн. Рос. эконом. ун-та им. Г.В. Плеханова. 2021. Т. 18. № 1 (115). С. 173–178.
9. Ефимов Е.Н., Лапицкая Е.М. Оценка эффективности мероприятий информационной безопасности в условиях неопределенности // Бизнес-информатика. 2015. № 1 (31). С. 51–57.
10. Тебекин А.В. Анализ проблем и перспектив реализации планов импортозамещения в отраслях промышленности // Транспортное дело России. 2022. № 2. С. 159–165.
11. Абдикеев Н.М. Импортозамещение в высокотехнологичных отраслях промышленности в условиях внешних санкций // Управленческие науки. 2022. Т. 12. № 3. С. 53–69.
12. Руднева Л.Н. Тенденции инновационного развития российской экономики // Фундаментальные исследования. 2023. № 2. С. 50–56.
13. Ашихмин Р.С., Борисова О.В. Искусственный интеллект: реальный потенциал для повышения эффективности бизнеса и государства // Вызовы цифровой экономики: технологический суверенитет и экономическая безопасность : сб. ст. VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Брянск, 2023. С. 45–48.
14. Авдеев Е.Е., Шитый А.Д. Использование искусственного интеллекта в целях повышения эффективности развития бизнеса и государства // Вызовы цифровой экономики: технологический суверенитет и экономическая безопасность : сб. ст. VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Брянск, 2023. С. 14–18.
15. Сивицкий Д.А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2021. № 2 (57). С. 33–41.
16. Краковский Ю.М., Киргизбаев В.П. Программно-математическое обеспечение для исследования показателей эффективности экономики информационной безопасности // System Analysis and Mathematical Modeling. 2024. Т. 6. № 2. С. 209–220.
17. Краковский Ю.М., Киргизбаев В.П. Системный подход к моделированию работ по устранению инцидентов информационной безопасности применительно к корпоративной информационной системе // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 1 (85). С. 116–126.
18. Краковский Ю.М., Киргизбаев В.П. Моделирующая программа для оценки финансового состояния денежного фонда с учетом отдельных работ по устранению инцидентов информационной безопасности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2025. № 2 (38). С. 74–82.
19. Королев В.Ю., Бенинг В.Е., Шоргин С.Я. Математические основы теории рисков. М. : Физматлит, 2011. 620 с.
20. Анфилов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. М. : Финансы и статистика, 2009. 368 с.
21. Туганбаев А.А., Крупин В.Г. Теория вероятностей и математическая статистика. СПб. : Лань, 2011. 223 с.
22. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М. : Физматлит, 2006. 813 с.
23. Кельтон В.Д., Лоу А.М. Имитационное моделирование. СПб. : Питер, 2004. 847 с.
24. Лутц М. Изучаем Python. Т. 1. СПб. : Диалектика, 2019. 832 с.

References

1. Kondaurou S.N., Bunina A.V., Mitrofanov A.V. Problemy obespecheniya informatsionnoi bezopasnosti v korporativnykh setyakh [Problems of ensuring information security in corporate networks]. *Sbornik nauchnykh statei III Vserossiiskoi*

nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Sovremennye informatsionnye tekhnologii i informatsionnaya bezopasnost'» [Proceedings of Scientific Articles of the III All-Russian Scientific and Technical Conference «Modern Information Technologies and Information Security»]. Kursk, 2024, pp. 69–72.

2. Krakovskii Y.M. Metody zashchity informatsii [Methods of Information Protection]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2021. 236 p.

3. Shpak A.A. Sovremennye ugrozy informatsionnoi bezopasnosti [Modern threats to information security]. *Sovremennoe pravo* [Modern law], 2024, no 1, pp. 106–108.

4. Ershova T.V., Khokhlov Yu.E. Tsifrovaya ekonomika: ot teoreticheskikh kontseptsii k rossiiskoi praktike [Digital economy: from theoretical concepts to Russian practice]. *Zhurnal Novoi ekonomicheskoi assotsiatsii* [Journal of the New Economic Association], 2025, no 2 (67), pp. 234–243.

5. Vishnevskii K.O., Gokhberg L.M., Dement'ev V.V., Dranev Yu.Ya., Klubova M.A., Kotsemir M.N., Kuz'minov I.F., Lola I.S., Privorotskaya S.G., Rudnik P.B., Sokolov A.V., Strel'tsova E.S., Turovets Yu.V., Fursov K.S., Khabirova E.E., Altynov A.I., Evtushenko V.E., Kuchin I.I., Lobanova P.A. Tsifrovye tekhnologii v rossiiskoi ekonomike [Digital technologies in the Russian Economy]. Moscow: NIU VShE Publ., 2021. 116 p.

6. Starodubova A.A., Iskhakova D.D. Innovatsionnye strategii tsifrovyykh predpriyatii dlya dostizheniya ustoichivogo razvitiya v regionakh [Innovative strategies of digital enterprises for achieving sustainable development in the regions], *π-Economy*, 2023, Vol. 16, no 1, pp. 39–50.

7. Oganessian L.L., Kozyr' N.S. Proektnoe upravlenie v informatsionnoi bezopasnosti [Project management in information security]. *Vestnik Akademii znaniy* [Bulletin of the Academy of Knowledge], 2023, no 4 (57), pp. 207–209.

8. Sizov V.A., Drozhkin A.A. Modelirovanie ekonomiki informatsionnoi bezopasnosti sub'ekta ekonomicheskoi deyatel'nosti na osnove simpleks-metoda [Modeling the economics of information security of an economic entity based on the simplex method]. *Vestnik Rossiiskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G.V. Plekhanova* [Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics], 2021, Vol. 18, no 1 (115), pp. 173–178.

9. Efimov E.N., Lapitskaya E.M. Otsenka effektivnosti meropriyatii informatsionnoi bezopasnosti v usloviyakh neopredelennosti [Evaluation of the effectiveness of information security measures under conditions of uncertainty]. *Biznes-informatika* [Business Informatics], 2015, no 1 (31), pp. 51–57.

10. Tebekin A.V. Analiz problem i perspektiv realizatsii planov importozameshcheniya v otraslyakh promyshlennosti [Analysis of the problems and prospects of implementing import substitution plans in industry]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport Business of Russia], 2022, no 2, pp. 159–165.

11. Abdikeyev N.M. Importozameshchenie v vysokotekhnologichnykh otraslyakh promyshlennosti v usloviyakh vneshnikh sanktsii [Import substitution in high-tech industries under external sanctions]. *Upravlencheskie nauki* [Management Sciences], 2022, Vol. 12, no 3, pp. 53–69.

12. Rudneva L.N. Tendentsii innovatsionnogo razvitiya rossiiskoi ekonomiki [Trends in the innovative development of the Russian economy]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2023, no 2, pp. 50–56.

13. Ashikhmin R.S., Borisova O.V. Iskusstvennyi intellekt: real'nyi potentsial dlya povysheniya effektivnosti biznesa i gosudarstva [Artificial intelligence: the real potential for improving the efficiency of business and the state]. *Sbornik statei VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Vyzovy tsifrovoi ekonomiki: tekhnologicheskii suverenitet i ekonomicheskaya bezopasnost'»* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Challenges of the digital economy: technological sovereignty and economic security»]. Bryansk, 2023, pp. 45–48.

14. Avdeenko E.E., Shityi A.D. Ispol'zovanie iskusstvennogo intellekta v tselyakh povysheniya effektivnosti razvitiya biznesa i gosudarstva [The use of artificial intelligence in order to improve the efficiency of business and government development]. *Sbornik statei VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Vyzovy tsifrovoi ekonomiki: tekhnologicheskii suverenitet i ekonomicheskaya bezopasnost'»* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Challenges of the digital economy: technological sovereignty and economic security»]. Bryansk, 2023, pp. 14–18.

15. Sivitskii D.A. Analiz opyta i perspektiv primeneniya iskusstvennykh neironnykh setei na zheleznodorozhnom transporte [Analysis of the experience and prospects of using artificial neural networks in railway transport]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2021, no 2 (57), pp. 33–41.

16. Krakovskii Y.M., Kirgizbaev V.P. Programmo-matematicheskoe obespechenie dlia issledovaniya pokazatelei effektivnosti ekonomiki informatsionnoi bezopasnosti [Software and mathematical support for studying the efficiency indicators of the information security economy], *System Analysis and Mathematical Modeling*, 2024, Vol. 6, no 2, pp. 209–220.

17. Krakovskii Yu.M., Kirgizbaev V.P. Sistemnyi podkhod k modelirovaniyu rabot po ustraneniyu intsidentov informatsionnoi bezopasnosti primenitel'no k korporativnoi informatsionnoi sisteme [Systematic approach to modeling work to eliminate information security incidents in relation to a corporate information system]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System analysis. Modeling], 2025, no 1 (85), pp. 116–126.

18. Krakovskii Yu.M., Kirgizbaev V.P. Modeliruyushchaya programma dlya otsenki finansovogo sostoyaniya denezhnogo fonda s ucheto ot del'nykh rabot po ustraneniyu intsidentov informatsionnoi bezopasnosti [Modeling program for assessing the financial condition of a monetary fund, taking into account individual work to eliminate information security incidents]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2025, no 2 (38), pp. 74–82.

19. Korolev V.Yu., Bening V.E., Shorgin S.Ya. Matematicheskie osnovy teorii riskov [Mathematical Foundations of Risk Theory]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2011. 620 p.

20. Anfilatov V.S., Emel'yanov A.A., Kukushkin A.A. Sistemnyi analiz v upravlenii [System analysis in management]. Moscow: Finansy i statistika Publ., 2009. 368 p.

21. Tuganbaev A.A., Krupin V.G. Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2011. 223 p.

22. Kobzar' A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika [Applied mathematical statistics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2006. 813 p.
23. Law A.M., Kelton W.D. Imitatsionnoe modelirovanie [Simulation Modeling and Analysis]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2004. 847 p.
24. Lutz M. Izuchaem Python. T. 1 [Learning Python. Vol. 1]. Saint Petersburg: Dialektika Publ., 2019. 832 p.

Информация об авторах

Краковский Юрий Мечеславович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru.

Киргизбаев Владислав Павлович, аспирант кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: v.p.kirgizbaev@gmail.com.

Information about the authors

Yurii M. Krakovskii, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru.

Vladislav P. Kirgizbaev, Ph.D. Student of the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: v.p.kirgizbaev@gmail.com.

Расчет седла клапана, нагруженного герметизирующим усилием и давлением рабочей среды

Ю.И. Белоголов✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉belogolov_yi@irgups.ru

Резюме

Тонкостенные цельнометаллические уплотнения (оболочки) нашли применение во многих системах с высокими требованиями к герметичности. Соединения с их использованием обладают рядом положительных свойств и способны обеспечить необходимый уровень герметичности затвора при невысоких значениях герметизирующего усилия. Однако такие уплотнения не лишены и недостатков, одним из которых является чувствительность к условиям нагружения. При достижении определенных значений усилия со стороны привода может произойти разрушение тонкостенных уплотнений, что, в свою очередь, приведет к потере герметичности затвора. Совершенствование уплотнений может заключаться в снижении приведенной жесткости оболочки за счет ее размещения на упругой пластине, либо усложнения геометрической формы. Рассмотренный в научной статье подход к определению геометрических параметров (толщины) тонкостенного уплотнения пониженной жесткости позволяет поставить задачи динамического расчета (без давления герметизируемой среды) и статического (когда давление начинает действовать на элементы затвора). Расчет толщины выполняется с применением математического пакета PTC Mathcad, полученные значения используются в модуле APM Structure 3D-программы APM WinMachine v.20.0 для проведения статического расчета с учетом давления рабочей среды. Эквивалентные напряжения, возникающие в тонкостенном уплотнении, позволяют оценить выполнение требований по прочности в момент соударения элементов затвора, а также значение давления герметизируемой среды, которым может быть нагружено «седло». Полученные результаты аналитического расчета и моделирования могут применяться при проектировании уплотнительных соединений, содержащих тонкостенные металлические уплотнения, например быстродействующих клапанов.

Ключевые слова

трубопроводная арматура, «седло» клапана, тонкостенное металлическое уплотнение, конечно-элементное моделирование, уплотнения пониженной жесткости

Для цитирования

Белоголов Ю.И. Расчет седла клапана, нагруженного герметизирующим усилием и давлением рабочей среды / Ю.И. Белоголов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 145–153. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).145-153.

Информация о статье

поступила в редакцию: 04.06.2025 г.; поступила после рецензирования: 11.06.2025 г.; принята к публикации: 16.06.2025 г.

Calculation of a valve seat loaded with sealing force and working medium pressure

Yu. I. Belogolov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉belogolov_yi@irgups.ru

Abstract

Thin-walled all-metal seals (shells) have found application in many systems with high requirements for tightness. Connections with their use have a number of positive properties and are able to provide the required level of tightness of the gate at low values of the sealing force. However, such seals are not without disadvantages, one of which is the sensitivity of the thin-walled seal to loading conditions. When certain values of force from the drive are reached, destruction of thin-walled seals and loss of tightness of the gate can occur. One of the directions of improvement of seals is the reduction of the reduced rigidity of the shell due to its placement on an elastic plate, or a more complex geometric shape. The approach to determining the geometric parameters (thickness) of a thin-walled seal of low rigidity considered in the scientific article allows us to set the tasks of dynamic calculation without pressure of the sealed medium and static - when the pressure begins to act on the elements of the gate. The calculation of geometric parameters (thickness) is performed using the PTC Mathcad mathematical package, the obtained values are used in the APM Structure 3D module of the APM Win-Machine v.20.0 program for performing a static calculation taking into account the pressure of the working medium. Equivalent stresses arising in a thin-walled seal allow us to evaluate the fulfillment of strength requirements at the moment of impact of the valve elements, as well as the value of the pressure of the sealed medium, which can load the «seat». The obtained results of analytical calculation and modeling can be used in designing sealing joints containing thin-walled metal seals, for example, in quick-acting valves.

Keywords

pipeline fittings, «saddle» of valve, thin-walled metal seal, finite element modeling, seals with reduced rigidity

For citation

Belogolov Yu.I. Raschet sedla klapana, nagruzhennogo germetiziruyushchim usiliem i davleniem rabochei sredy [Calculation of a valve seat loaded with sealing force and working medium pressure]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 00–00. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).00-00.

Article Info

Received: June 4, 2025; Revised: June 11, 2025; Accepted: June 16, 2025.

Введение

Трубопроводная арматура (ТПА) является неотъемлемой частью многих ответственных конструкций и предназначена для управления потоком рабочей среды в системах бытового и промышленного назначения [1–3]. Перекрытие потока рабочей среды с определенной степенью герметичности выполняет, например, запорная арматура. В зависимости от типа, запорная ТПА может быть выполнена в виде задвижки, клапана, крана или дискового затвора.

В клапане запирающий или регулирующий элемент («золотник») перемещается вдоль оси потока рабочей среды [4]. Ответная часть золотника («седло») представляет собой неподвижный элемент, установленный в корпусе ТПА. Совокупность пары элементов «золотник – седло» образуют затвор уплотнительного соединения, например клапана, который обеспечивает требуемую степень герметичности.

На рис. 1 представлена принципиальная схема затвора клапана в открытом положении.

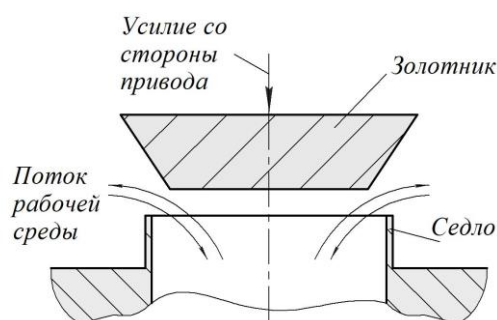


Рис. 1. Затвор клапана
Fig. 1. Valve shutter

В рассматриваемом примере «седло» клапана представляет собой тонкостенную осесимметричную оболочку, а «золотник» имеет тарельчатую форму с конусной уплотнительной поверхностью.

Перекрытие потока рабочей среды в затворе обеспечивается за счет перемещения «зо-

лотника» и посадки его на «седло» с усилием $F_{пр}$, создаваемым приводом клапана.

Поток рабочей среды создает давление P_p , которое в зависимости от направления является противодействующим усилию со стороны привода $F_{пр}$, либо дополняющим его:

$$F_{пр} = F_{гер} \pm P_p \frac{\pi DN^2}{4},$$

где $F_{гер}$ – нагрузка, при которой исключается газовый или жидкостной обмен между разделенными полостями затвора; DN – номинальный диаметр, определяющий конструктивный параметр ТПА по типоразмеру соединяемых частей арматуры.

В работах [5, 6] указано, что одним из направлений совершенствования уплотнений, выполненных из тонкостенной оболочки, является снижение приведенной жесткости, что позволяет обеспечить компенсацию (частично) ударных нагрузжений, а также минимизацию герметизирующего усилия в затворе.

Целью статьи является уточнение динамического расчета тонкостенного уплотнения при воздействии на него давления рабочей среды, моделирование уплотнения в APM Structure 3D, исходя из допустимых нагрузок для обеспечения прочности соединения.

Постановка задачи

В работе [7] приводится инженерная методика расчета рациональных геометрических размеров для тонкостенного оболочечно-пластинчатого «седла» клапана, позволяющая с необходимой точностью осуществить выбор оптимальных толщин для элементов затвора (оболочки и пластины) в условиях ударного нагружения и неопределенной максимальной динамической нагрузки при не превышении допускаемых напряжений для материала «седла».

Исходные геометрические параметры «затвора», необходимые для проведения исследований, представим в виде расчетной схемы (рис. 2).

Через «золотник» затвора на «седло» передается давление со стороны привода $F_{пр}$, обеспечивающее необходимое усилие герметизации $q_{гер}$ по периметру уплотнения. Наибольшее значение герметизирующей силы при статическом нагружении ($F_{ст}$) и без потери «седлом» прочностных свойств указано в табл. 1.

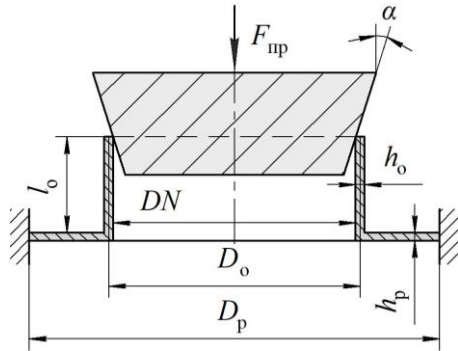


Рис. 2. Расчетная модель:

h_o – толщина оболочки; h_p – толщина пластины;
 l_o – высота оболочки; D_o – диаметр образующей
 оболочки; D_p – диаметр пластины

Fig. 2. Calculation model:

h_o – shell thickness; h_p – plate thickness;
 l_o – shell height; D_o – shell generatrix diameter;
 D_p – plate diameter

Таблица 1. Геометрические размеры «седла» клапана и нагрузка

Table 1. Geometric dimensions of the valve seat and load

Наименование показателя Name of the indicator	Значение
Нагрузка ($F_{ст}$, Н) Load	450
Толщина (h_o / h_p , мм) Thickness	1/1
Высота (l_o , мм) Height	$\beta_l / \beta(h_o)$
Диаметр (D_o / D_p , мм) Diameter	39/85
Угол конуса (α , град.) Cone angle	15

Значение β определяет параметр оболочечного элемента, который рассчитывается по формуле:

$$\beta(h_o) = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{r^2 \cdot h^2}}.$$

Расчетные схемы тонкостенного «седла» представлена на рис. 3. Принимается допущение о приложении нагрузок по срединной поверхности [7].

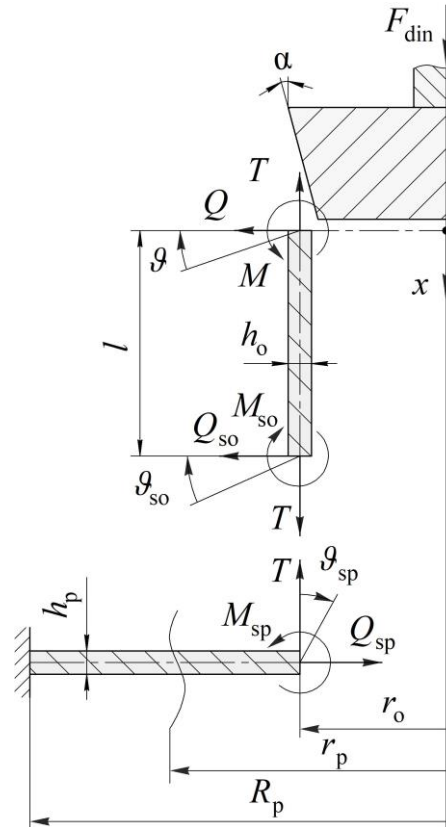


Рис. 3. Расчетная схема «седла»:

T – интенсивность осевой силы; Q – интенсивность радиальной силы; M_{sp}, M_{so} – изгибающие моменты

Fig. 3. Saddle calculation scheme:

T – axial force intensity; Q – radial force intensity;
 M_{sp}, M_{so} – bending moments

Первое условие совместности деформаций «седла»:

$$D_o \beta^2 \left[-4A_0 K_2(\beta l) - 4A_1 K_3(\beta l) + \frac{Q}{D_o \beta^3} K_1(\beta l) \right] =$$

$$= D_p \left[C_1(1+\mu) - \frac{C_2}{r_o^2}(1-\mu) + \frac{Tr_o}{2D_p} + \right.$$

$$\left. + (1+\mu) \frac{Tr_o}{2D_p} \ln \frac{r_o}{R_p} \right].$$

Объединенное второе и третье условия совместности деформаций «седла»:

$$A_0 K_0(\beta l) + A_1 K_1(\beta l) + \frac{Q}{D_o \beta^3} K_3(\beta l) - \frac{\mu Tr_o}{Eh_o} =$$

$$= \frac{(R_p - r_o)}{Eh_o} (1-\mu) D_o \beta^3 \cdot$$

$$\cdot \left[-4A_0 K_1(\beta l) - 4A_1 K_2(\beta l) + \frac{Q}{D_o \beta^3} K_0(\beta l) \right].$$

Четвертое условие совместности деформаций «седла»:

$$C_1 r_o + \frac{C_2}{r_o} + \frac{Tr_o^2}{2D_p} \ln \frac{r_o}{R_p} =$$

$$= \beta \cdot \left[-4A_o K_3(\beta l) + A_1 K_o(\beta l) + \frac{Q}{D_o \beta^3} K_2(\beta l) \right];$$

$$C_1 R_p + \frac{C_2}{R_p} = 0.$$

Методика позволяет постановить следующие задачи расчета тонкостенного «седла»:

1. Динамический расчет «седла» (учитывается E_k):

- целевая функция: $c_{пр}(h_o, h_p) \rightarrow \min$;
- ограничения:

$$\sigma_{экр.о.макс}(x) \leq \sigma_{adm};$$

$$\sigma_{экр.р.макс}(r_p) \leq \sigma_{adm}.$$

2. Проверочный расчет седла клапана ($F = F_{st}$) с учетом действия рабочей среды (w^*):

- ограничения:

$$\sigma_{экр.о.макс}(x) \leq \sigma_{adm};$$

$$\sigma_{экр.р.макс}(r_p) \leq \sigma_{adm}.$$

Динамический расчет тонкостенного «седла» выполним с применением PTC Mathcad. Проверочный расчет при статическом нагружении «седла» выполним в модуле APM Structure 3D системы APM WinMachine v.20.0.

Процесс перекрытия потока рабочей среды P_p может протекать достаточно быстро. В [7–9] максимальная динамическая (ударная) нагрузка при перекрытии затвора может быть определена по формуле:

$$F_{din}(h_o, h_p) = F_{st} +$$

$$+ \sqrt{\frac{F_{st}^2 + 2 \cdot E_k \cdot [c_1 + c_2(h_o, h_p) \cdot \tan(\alpha) \cdot \tan(\alpha + \varphi)] \cdot c_3(h_o, h_p)}{c_1 + c_2(h_o, h_p) \cdot \tan(\alpha) \cdot \tan(\alpha + \varphi) \cdot c_3(h_o, h_p)}}$$

где c_1 – жесткость приводной части затвора; c_2 – радиальная жесткость оболочки; c_3 – жесткость пластины.

Параметры F_{din} , c_2 и c_3 показаны как функции, зависящие от геометрических размеров тонкостенного «седла».

В качестве материала тонкостенного оболочечно-пластинчатого «седла» выберем сплав БрО5Ц5С5, имеющий следующие параметры:

- модуль Юнга $E = 9 \cdot 10^4$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$;
- коэффициент трения в стыке $f = 0,1$;

– параметр оболочки $\beta l = 3$;

– кинетическая энергия $E_k = 100$ Н · мм;

– энергия выбора отклонения формы $E_\phi = 0$;

– допускаемое напряжение $\sigma_{adm} = 260$ МПа.

Значения толщин оболочки h_o и пластины h_p (см. табл. 1) являются начальными приближениями, которые задаются перед расчетом. В дальнейшем решение оптимизационной задачи с минимизацией толщины тонкостенного оболочечно-пластинчатого «седла» при условии сохранения прочностных свойств позволит уточнить эти геометрические параметры.

Подставив исходные данные в ранее указанную методику, выполним расчет тонкостенного оболочечно-пластинчатого «седла» клапана (рис. 2). С целью автоматизации расчетов выполним его в инженерном математическом пакете PTC Mathcad.

Проверка выполнения условия по допускаемым напряжениям

Подпрограммы для проверки условия по допускаемым напряжениям для оболочки и пластины выполнены в соответствии с указаниями [7, 9]. Перед выполнением подпрограмм определяются значения аргументов R , X и значения функций $\sigma(R)$, $\sigma(X)$ для пластины и оболочки соответственно:

$$R = 42,5; X = \beta l / \beta(h_o);$$

$$r_p = 19,5, 19,6 \dots R; x = 0, 0,1 \dots X;$$

$$\sigma(r_p) = \sqrt{\frac{\sigma_{r.p.макс}(h_p, h_o, r_p)^2 + \sigma_{t.p.макс}(h_p, h_o, r_p)^2 - \sigma_{r.p.макс}(h_p, h_o, r_p) \cdot \sigma_{t.p.макс}(h_p, h_o, r_p)}{}}$$

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sigma_{x.o.макс}(h_p, h_o, x)^2 + \sigma_{t.o.макс}(h_p, h_o, x)^2 - \sigma_{x.o.макс}(h_p, h_o, x) \cdot \sigma_{t.o.макс}(h_p, h_o, x)}{}}$$

Подпрограмма для пластины:

$$\sigma_{экр.р}(\sigma, r_n, r_k, N) =$$

$R \leftarrow r_n$
$A1 \leftarrow \sigma(R)$
$while R \leq r_k$
$R \leftarrow R + \frac{r_k - r_n}{N}$
$A2 \leftarrow \sigma(R)$
$if A2 > A1$
$A1 \leftarrow A2$
$R1 \leftarrow R$
вывод результата в
$(A1R1)^T$

Подпрограмма для оболочки:

```

 $\sigma_{\text{экв.о}}(\sigma, r_n, r_k, N) =$ 
   $X \leftarrow x_n$ 
   $A1 \leftarrow \sigma(X)$ 
  while  $X \leq x_k$ 
     $X \leftarrow X + \frac{x_k - x_n}{N}$ 
     $A2 \leftarrow \sigma(X)$ 
    if  $A2 > A1$ 
       $A1 \leftarrow A2$ 
       $X1 \leftarrow X$ 
  вывод результата в
   $(A1 X1)^T$ 

```

Внутри циклов (while $R < r_k$ и while $X < x_k$) для N значений аргумента определяются значения функций $\sigma(R)$ и $\sigma(X)$. Каждое значение функции сравнивается с предыдущим и, если оно больше предыдущего, записывается как максимальное $A1$, так же $R1$ и $X1$ записываются как значения аргументов [7, 10].

По окончании расчетов (закрытие цикла while) последние значения $A1$, $R1$ и $A1$, $X1$ выводятся из подпрограмм с помощью составных массивов [10].

Результаты расчета

После проведенного расчета и уточнения геометрических параметров тонкостенного металлического «седла» были получены следующие значения толщин:

- для оболочки «седла» $h_o = 0,936$ мм;
- для пластины «седла» $h_p = 1,757$ мм.

Для проверки неперевышения полученных значений эквивалентных напряжений для заданного материала «седла» над допускаемыми выполним построение графиков для оболочки и пластины (рис. 4).

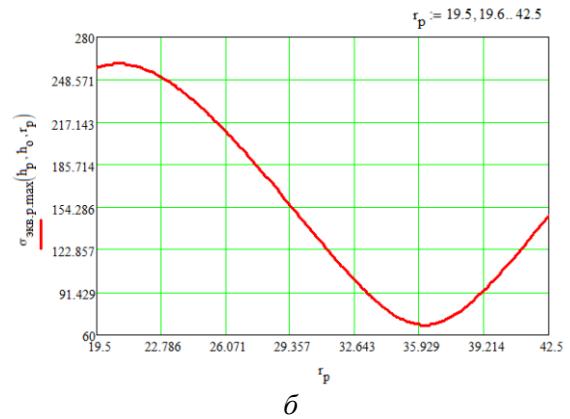
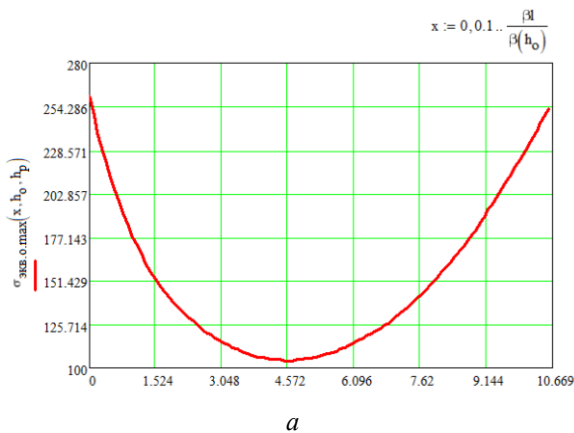


Рис. 4. Графики напряжений, возникающих в тонкостенном уплотнении:
а – в оболочке; б – в пластине

Fig. 4. Graphs of stresses arising in a thin-walled seal:
а – in the shell; б – in the plate

Наибольшие эквивалентные напряжения в оболочке возникают при значении координаты $x = 0$ мм (рис. 5, а) в месте контакта «седла» с «золотником». Максимальные эквивалентные напряжения в пластине, возникают при значении радиуса $r_p = 20,6$ мм (рис. 5, б).

$x := 0, 0.1 \dots 1$

$\sigma_{\text{экв.о.макс}}(x, h_o, h_p)$

260.001
249.112
238.882
229.286
220.298
211.892
204.041
196.718
189.894
183.541
177.631

а

$r_p := 20, 20.1 \dots 21$

$\sigma_{\text{экв.р.макс}}(h_p, h_o, r_p)$

259.034
259.326
259.565
259.75
259.884
259.967
260
259.985
259.922
259.812
259.657

б

Рис. 5. Вывод результатов по напряжениям:

а – для оболочки; б – для пластины

Fig. 5. Output of stress results:

а – for the shell; б – for the plate

В месте сопряжения пластины и оболочки значения эквивалентных напряжений совпадают:

$$\sigma_{\text{экв.о.макс}}(x, h_o, h_p) = \sigma_{\text{экв.р.макс}}(h_p, h_o, r_p) = 256,72 \text{ МПа},$$

при значениях $r_p = 19,5$ мм и $x = 10,6685$ мм.

Следует отметить, что эквивалентные напряжения, полученные при первоначальном

расчете тонкостенного «седла», могут превышать допускаемые, что является следствием ряда ограничений системы PTC Mathcad. Используемый для расчета блок Given ограничен начальными приближениями и выполняет заданные ограничения по допускаемым напряжениям только для рассчитанных координат, не проводя проверки по всему радиусу пластины r_p и высоте оболочки l_0 тонкостенного «седла».

Применение подпрограмм поиска экстремума функции позволяет запустить проверку по всему радиусу пластины и длине оболочки с целью уточнений координаты и наибольшего значения напряжения в ней для расчетного блока Given PTC Mathcad. Указанную проверку можно проводить неограниченное количество раз, уточняя значение геометрических размеров (толщины) «седла» для соблюдения условий по допускаемым напряжениям.

Моделирование «седла»

Смоделируем тонкостенное оболочечно-пластинчатое «седло» клапана в модуле конечно-элементного анализа APM Structure 3D системы APM WinMachine v.20.0 [11–13] с учетом рассчитанных геометрических параметров (толщины).

Конечно-элементная модель тонкостенного «седла» клапана представлена на рис. 6. Моделирование проводится с использованием конечного элемента «пластина» для оболочки толщиной $h_0 = 0,936$ мм, а для пластины «седла» $h_p = 1,757$ мм.

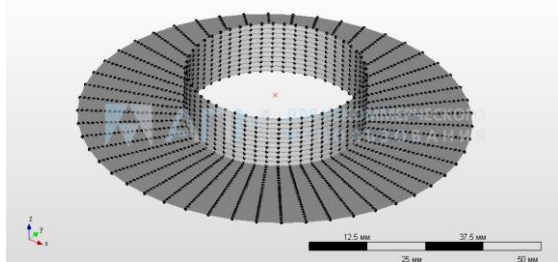


Рис. 6. Конечно-элементная модель тонкостенного оболочечно-пластинчатого «седла» клапана

Fig. 6. Finite element model of a thin-walled shell-plate valve seat

Нагрузка привода на тонкостенное «седло» передается через дополнительный узел и группу специальных стержней (рис. 7), обозначенных в APM Structure 3D как «жесткие элементы». Значение усилия, создаваемого приво-

дом F_{st} , указано в табл. 1. Угол приложения нагрузки определяется углами конусности «золотника» $\alpha = 15$ и трения $f = 0,1$ (5°).

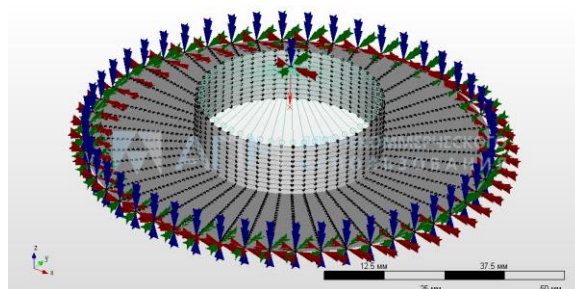


Рис. 7. Модель «седла», нагруженного силой F_{st} с жесткой заделкой по периметру пластины

Fig. 7. Model of a «saddle» loaded with force F_{st} with rigid fixation around the perimeter of the plate

По периметру пластины (внешнему радиусу) моделируется жесткая заделка. Для дополнительного узла, через который передается нагрузка «жестким элементам», ограничиваются повороты и перемещения для всех осей, за исключением Z, вдоль которой перемещается «золотник».

Результаты моделирования «седла»

Проведенный статический расчет (без учета давления рабочей среды) оболочечно-пластинчатого «седла» клапана в APM Structure 3D (рис. 8) показал, что наибольшие значения напряжений возникают на торце оболочки – 133,6 МПа.

В месте сопряжения пластины и оболочки, а также по периметру пластины в заделке значения напряжений меньше (рис. 9). Расчет в APM Structure 3D также показал отсутствие максимальных напряжений при значении радиуса пластины $r_p = 20,6$ мм в сравнении с аналитическими расчетами PTC Mathcad.

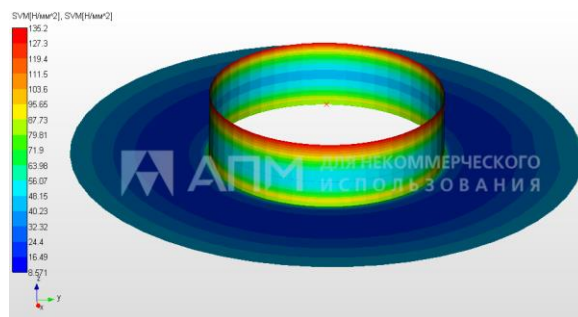


Рис. 8. Карта результатов напряжений SVM при статическом расчете «седла»

Fig. 8. SVM stress map results for static saddle calculation

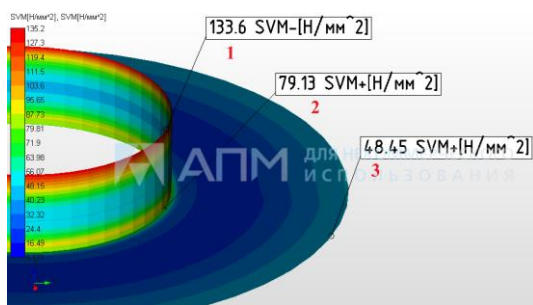


Рис. 9. Значения напряжений SVM:

1 – на торце оболочки; 2 – в месте сопряжения оболочки и пластины; 3 – в заделке

Fig. 9. SVM stress values:

1 – at the end of the shell; 2 – at the junction between the shell and the plate; 3 – in the embedment

На рис. 10 представлена деформированная конструкция тонкостенного «седла» клапана. Визуализация деформаций «седла» на «Карте напряжений» носит условный характер и показана с учетом более наглядного представления изменения геометрии уплотнения.

Представленная деформированная модель уплотнения, а также возникшие напряжения характерны после затухания колебаний в затворе и нагружения «седла» усилием герметизации $q_{\text{гер}}$.

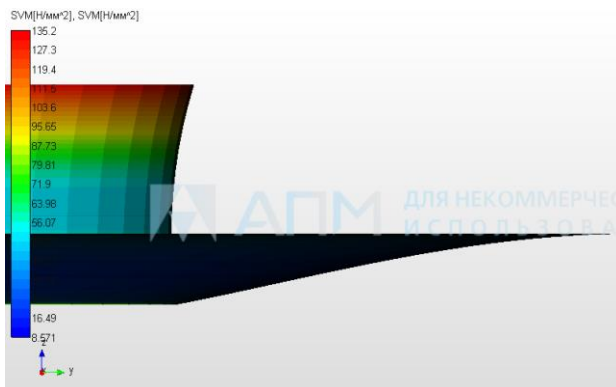


Рис. 10. Карта деформаций тонкостенного «седла»

Fig. 10. Deformation map of a thin-walled «saddle»

Значения эквивалентных напряжений, полученных при динамическом (ударном) нагружении (260 МПа) тонкостенного «седла», практически в 2 раза превышают значения при статическом расчете (133,6 МПа). Это еще раз подтверждает, что использование линейных моделей нагружения оболочки на участке фактической нелинейности может привести к значительным ошибкам в оценке прочности тонкостенного уплотнения [14, 15].

Ранее было принято, что за время быстрого ударного нагружения «седла» давление рабочей среды не воздействует на тонкостенное уплотнение [16–18]. Рассчитанные геометрические параметры «седла» позволяют выдержать первичное соударение элементов затвора. Значение кинетической энергии «золотника» при последующих соударениях с «седлом» меньше и в дальнейшем компенсируется силой трения в стыке. После перекрытия потока рабочей среды происходит нагружение седла ее давлением.

Проведем моделирование и расчет тонкостенного «седла» при значениях давления рабочей среды, обеспечивающего не превышение допускаемого напряжения $\sigma_{adm} = 260$ МПа.

На рис. 11 представлена карта эквивалентных напряжений, полученных при моделировании «седла» после перекрытия затвора и нагружения уплотнения распределенной нагрузкой давления рабочей среды $P_p = 0,77$ Н/мм². Указанное значение распределенной нагрузки приложено к каждому пластинчатому элементу оболочки и пластины.

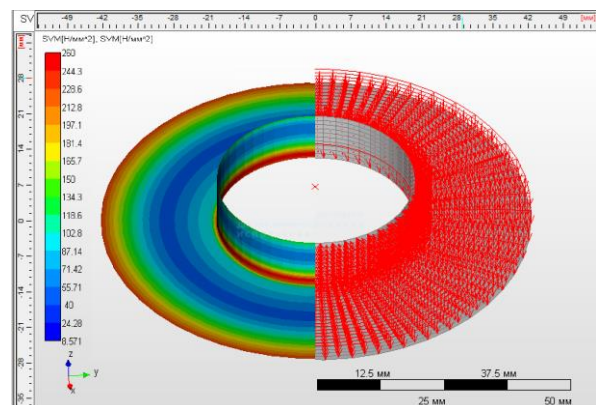


Рис. 11. Карта напряжений SVM при подаче давления рабочей среды на «седло»

Fig. 11. SVM stress map when applying pressure of the working medium to the «saddle»

Заключение

Представленная методика расчета позволяет выполнить оптимизационный расчет «седла» при заранее неопределенной динамической нагрузке и геометрических параметрах (толщины). Логическим развитием проведенных расчетов «седла» является моделирование в APM Structure 3D, что позволяет уточнить значение давления рабочей среды уже после перекрытия затвора. Следует отметить, что в рассматриваем-

мом примере принято направление потока рабочей среды «на золотник». Для моделирования обратной ситуации (среда направлена «под золотник») достаточно приложить значение указанного давления со знаком «–» к дополнительному узлу (для пластины), передающему усилие со стороны привода. Давление на оболочку моделируется по внутренней поверхности аналогично рассмотренному примеру.

Полученные значения эквивалентных напряжений в тонкостенном «седле» позволяют определить и проанализировать значения допу-

стимых нагрузок с целью обеспечения прочности уплотнения. Кроме того, после выполнения статического расчета в APM Structure 3D может быть определена статическая нагрузка на «седло» для фланцевых соединений, в которых динамическая составляющая отсутствует.

Представленные аналитические результаты расчета и моделирования могут быть использованы при проектировании уплотнительных соединений, содержащих тонкостенные металлические уплотнения, например быстродействующих клапанов [19, 20].

Список литературы

1. Уплотнения и уплотнительная техника / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер и др. М. : Машиностроение, 1986. 464 с.
2. Кармугин Б.В., Стратиневский Г.Г., Мендельсон Д.А. Клапанные уплотнения пневмогидроагрегатов. М. : Машиностроение, 1983. 152 с.
3. Гуревич Д.Ф. Трубопроводная арматура. Л. : Машиностроение, 1981. 368 с.
4. ГОСТ 24856-2014. Арматура трубопроводная. Термины и определения. Введ. 2015–04–01. М. : Стандартинформ, 2020. 90 с.
5. Белоголов Ю.И. Компенсация усилий, действующих на затвор со стороны герметизируемой среды // Проблемы транспорта Восточной Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Иркутск, 2012. С. 124–128.
6. Долотов А.М., Гозбенко В.Е., Белоголов Ю.И. Уплотнительные соединения с использованием тонкостенных элементов / Иркут. гос. ун-т путей сообщ. Иркутск, 2011. Деп. в ВИНТИ РАН 22.11.2011, № 508-В2011. 72 с.
7. Белоголов Ю.И. Совершенствование конструкций уплотнительных соединений с тонкостенными элементами (упругой кромкой) : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2013. 178 с.
8. Долотов А.М., Ереско С.П., Огар П.М. Основы теории проектирования уплотнений гидропневмо-вакуумных систем. Красноярск : СибГАУ, 2013. 307 с.
9. Долотов А.М., Огар П.М., Чегодаев Д.Е. Основы теории и проектирования уплотнений пневмогидроарматуры летательных аппаратов. М. : Изд-во МАИ, 2000. 296 с.
10. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad 14. М. : Питер, 2007. 591 с.
11. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде APM Structure 3D. М. : АПМ, 2010. 375 с.
12. К расчету напряженно-деформированного состояния слоистого упругого тела / П.М. Огар, О.В. Максимова, А.Н. Автушко и др. // Тр. Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки развитию регионов. 2006. Т. 2. С. 297–302.
13. Руководство пользователя APM Structure. М. : Науч.-техн. центр «АПМ», 2010. 226 с.
14. Герасимов С.В., Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Математическая модель динамического нагружения двухседельного клапана // Тр. Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 126–129.
15. Огар П.М., Тарасов В.А., Межецкий В.И. Расчет герметичности затворов трубопроводной арматуры и сосудов высокого давления // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 1 (9). С. 45–50.
16. Уплотнения и уплотнительная техника / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.В. Гордеев и др. М. : Машиностроение, 1994. 448 с.
17. Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры. Л. : Машиностроение, 1969. 887 с.
18. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. 2. Некоторые задачи прикладной теории упругости. Расчеты за пределами упругости. Расчеты на ползучесть / С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев и др. М. : Машгиз, 1958. 975 с.
19. Хильчевский В.В., Ситников А.Е., Ананьевский В.А. Надежность трубопроводной пневмогидроарматуры. М. : Машиностроение, 1989. 208 с.
20. Щучинский С.Х. Электромагнитные приводы исполнительных механизмов. М. : Энергоатомиздат, 1984. 153 с.

References

1. Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B., Gordееv V.V., Furmanov B.A., Karmugin B.V. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika [Seals and sealing equipment]. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1986. 464 p.
2. Karmugin B.V., Stratinevskii G.G., Mendel'son D.A. Klapannye uplotneniya pnevmogidroagregatov [Valve seals of pneumohydraulic units]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 152 p.
3. Gurevich D.F. Truboprovodnaya armatura [Pipeline fittings]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1981. 368 p.
4. GOST 24856-2014. Armatura truboprovodnaya. Terminy i opredeleniya [State Standard 24856-2014. Pipeline valves. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform Publ., 2020. 90 p.

5. Belogolov Yu.I. Kompensatsiya usilii, deistvuyushchikh na zatvor so storony germetiziruemoi sredy [Compensation for the efforts acting on the shutter from the side of the sealed medium]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii mo-lodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Problemy transporta Vostochnoi Sibiri»* [Proceedings of All-Russian scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students «Problems of transport of Eastern Siberia»]. Irkutsk, 2012, pp. 124–128.
6. Dolotov A.M., Gozbenko V.E., Belogolov Yu.I. Uplotnitel'nye soedineniya s ispol'zovaniem tonkostennykh elementov [Sealing joints using thin-walled elements]. Deposited manuscript no 508-V2011 November 22, 2011. 72 p.
7. Belogolov Yu.I. Sovershenstvovanie konstruktssii uplotnitel'nykh soedinenii s tonkostennymi elementami (uprugoi kromkoi) [Improvement of the designs of sealing joints with thin-walled elements (elastic edge)]. Ph.D.'s theses. Irkutsk, 2013. 178 p.
8. Dolotov A.M., Eresko S.P., Ogar P.M. Osnovy teorii proektirovaniya uplotnenii gidropnevmo-vakuumnykh sistem [Fundamentals of the theory of designing seals for hydropneumatic-vacuum systems]. Krasnoyarsk: SibGAU Publ., 2013. 307 p.
9. Dolotov A.M., Ogar P.M., Chegodaev D.E. Osnovy teorii i proyektirovaniya uplotnenii pnevmogidroarmatury letatel'nykh apparatov [Fundamentals of the theory and design of seals for aircraft pneumohydraulic fittings]. Moscow: MAI Publ., 2000. 296 p.
10. Makarov E.G. Inzhenernye raschety v Mathcad 14 [Engineering calculations in Mathcad 14]. Moscow: Piter Publ., 2007. 591 p.
11. Zamrii A.A. Proektirovanie i raschet metodom konechnykh elementov trekhmernykh konstruktssii v srede APM Structure 3D [Design and calculation by the finite element method of three-dimensional structures in the APM Structure 3D environment]. Moscow: APM Publ., 2010. 375 p.
12. Ogar P.M., Maksimova O.V., Avtushko A.N., Ustyuzhanin E.V. K raschetu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sloistogo uprugogo tela [To calculate the stress-strain state of a layered elastic body]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki razvitiyu regionov* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering sciences for the development of regions], 2006, Vol. 2, pp. 297–302.
13. Rukovodstvo pol'zovatelya APM Structure [APM Structure User's Guide]. Moscow: APM Publ., 2010. 226 p.
14. Gerasimov S.V., Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Matematicheskaya model' dinamicheskogo nagruzheniya dvukhsedel'nogo klapana [Mathematical model of dynamic loading of a two-seated valve]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences], 2012, Vol. 1, pp. 126–129.
15. Ogar P.M., Tarasov V.A., Mezhet'skii V.I. Raschet germetichnosti zatvorov truboprovodnoi armatury i sudov vysokogo davleniya [Calculation of the tightness of valves of pipeline fittings and high-pressure vessels]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2011, no 1 (9), pp. 45–50.
16. Kondakov L.A., Golubev A.I., Gordeev V.V., Ovander V.B., Furmanov V.A., Karmugin B.V. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika [Seals and sealing equipment]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1994. 448 p.
17. Gurevich D.F. Raschet i konstruirovaniye truboprovodnoi armatury [Calculation and design of pipeline fittings]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1969. 887 p.
18. Ponomarev S.D., Biderman V.L., Likharev K.K., Makushin V.M., Malinin N.N., Feodos'ev V.I. Raschety na prochnost' v mashinostroenii. T. 2. Nekotorye zadachi prikladnoi teorii uprugosti. Raschety za predelami uprugosti. Raschety na polzuchest' [Strength calculations in mechanical engineering. Vol. 2. Some problems of the applied theory of elasticity. Calculations beyond the limits of elasticity. Creep calculations]. Moscow: Mashgiz Publ., 1958. 975 p.
19. Khil'chevskii V.V., Sitnikov A.E., Anan'evskii V.A. Nadezhnost' truboprovodnoi pnevmogidroarmatury [Reliability of pipeline pneumohydroarmature]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1989. 208 p.
20. Shchuchinskii S.Kh. Elektromagnitnye privody ispolnitel'nykh mekhanizmov [Electromagnetic actuators]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1984. 153 p.

Информация об авторах

Белоголов Юрий Игоревич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: belogolov_yi@irgups.ru.

Information about the authors

Yurii I. Belogolov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Work Operation Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: belogolov_yi@irgups.ru.

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№2 (86)
2 0 2 5

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **Ю.А. Трофимов**
Ответственный за выпуск **И.Ю. Ермоленко**

Подписано в печать 27.06.2025. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 30.06.2025

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,79.

Уч.-изд. л. 12,22. Тираж 500 экз. Заказ № 3787

Подписной индекс по каталогу «Урал-Пресс»: 64556

ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ РАН.

Сведения о журнале ежегодно

публикуются в международной справочной системе

по периодическим и продолжающимся изданиям

«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01

Маркировка информационной продукции - не маркируется

Цена свободная

Адрес редакции, издательства и типографии

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения

Телефон: 8(3952) 63-83-74, E-mail: stsam@irgups.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Учредитель: ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет путей сообщения
(664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)