

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

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.

Modern technologies.
System analysis. Modeling

2024 № 3(83)
№ 3(83)

Современные технологии.
Системный анализ. Моделирование

ISSN 1813-9108 (Print)

Современные технологии Системный анализ Моделирование

2024
№ 3 (83)

Иркутский государственный
университет путей сообщения

Машиностроение • Транспортные системы • Информационные технологии

Machine Building • Transport Systems • Information Technology

Modern technologies System analysis Modeling

2024
No. 3 (83)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie



Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№ 3 (83)

2 0 2 4

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **Ю.А. Трофимов**
Ответственный за выпуск **Д.В. Буторин**

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)

Д.В. Буторин, 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)
2024
No. 3 (83)
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)

D.V. Butorin, 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 Reserch 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

Денисов И.Н., Третьяков Е.А. Управление электроподвижным составом с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения железных дорог 10

Асалханова Т.Н., Осколков А.А. Предиктивная аналитика в планировании контингента монтеров пути в автоматизированных системах управления железнодорожным транспортом 20

Певзнер В.О., Баронайте Р.А. Совершенствование системы оценки стабильности участка пути на перегоне для перспективного планирования выправочных работ 31

Бакланов А.А., Шиляков А.П. Оценка применения рекуперативного торможения электровозов для повышения энергетической эффективности электрической тяги и безопасности движения поездов 41

Литвинцев С.О., Лобыцин И.О., Кудрявцева М.В., Богуславская Н.М. Маршрутизация контейнерных поездов в современных условиях 52

Крюков А.В., Черепанов А.В., Нгуен Куок Хиену Применение кабельных линий электропередачи в системах внешнего электроснабжения железных дорог постоянного тока 67

Ковенькин Д.А., Живин Р.И. Экспериментальные исследования по определению суммарных боковых сил в кривых участках пути со шпалами типоразмера 1 526 мм 78

Власова Н.В., Брытков В.С. Анализ состояния транспортно-логистического бизнес-блока холдинга ОАО «РЖД» с целью повышения качества предоставления услуг клиентам железнодорожного транспорта по перевозке навалочных грузов в специализированных контейнерах 91

Булохова Т.А., Оленцевич В.А. Вопросы повышения эффективности системы таможенного контроля железнодорожного пункта пропуска 107

Емельянов А.Г., Роголёв А.В., Морозов Е.А. Применение имитационного моделирования при разработке устройства контроля состояния опоры контактной сети при ее разземлении 119

Информационные технологии

Лакин И.И. Диагностирование подвижного состава с применением RBF-сетей 133

Краковский Ю.М., Колисниченко Е.А., Начигин В.А. Математическое обеспечение для выбора сценария учебной программы в условиях цифровой железной дороги	143
Белоголов Ю.И. Снижение осевых и радиальных деформаций тонкостенного оболочечного уплотнения	153

CONTENTS

Transport Systems

Denisov I.N., Tret'yakov E.A. Control of electric rolling stock taking into account operation modes of railway traction power supply system	10
Asalkhanova T.N., Oskolkov A.A. Predictive analytics in the planning of a contingent of track fitters in automated railway transport management systems	20
Pevzner V.O., Baronaite R.A. Improvement of the system for assessing the stability of the railway track section for prospective planning of straightening works	31
Baklanov A.A., Shilyakov A.P. Evaluation of the use of regenerative braking of electric locomotives to improve the energy efficiency of electric traction and train safety	41
Litvintsev S.O., Lobytsin I.O., Kudryavtseva M.V., Boguslavskaya N.M. Routing of container trains in modern conditions	52
Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Nguyen Quoc Hieu Application of cable lines in external power supply systems of DC railways	67
Koven'kin D.A., Zhivin R.I. Experimental studies to determine the total lateral forces in curved sections of track with sleepers of standard size 1 526 mm	78
Vlasova N.V., Brytkov V.S. Analysis of the state of the transport and logistics business-block of the Russian Railways holding company in order to improve the quality of services provided to railway customers for the transportation of bulk cargo in specialized containers	91
Bulokhova T.A., Olentsevich V.A. Issues of improving the effectiveness of the customs control system of the railway checkpoint	107
Emel'yanov A.G., Rogalev A.V., Morozov E.A. The use of simulation modeling in the development of a device for monitoring the state of contact network support when it is ungrounded	119

Information Technology

Lakin I.I. Rolling stock diagnostics using RBF networks	133
--	-----

Bulokhova T.A., Olentsevich V.A. Mathematical software for choosing a curriculum scenario in a digital railway environment	143
Belogolov Yu.I. Reduction of axial and radial deformations of thin-walled shell seals	153

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.ircgups.ru> (<http://ojs.ircgups.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 Г-304. Каимов Евгений Витальевич.

Телефон: 8(3952) 63-83-74. E-mail: stsam@ircgups.ru

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

TRANSPORT SYSTEMS

Управление электроподвижным составом с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения железных дорог

И.Н. Денисов, Е.А. Третьяков✉

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

✉eugentr@mail.ru

Резюме

Развитие цифровых технологий на железнодорожном транспорте позволяет преодолеть ряд технологических барьеров, связанных с ограничением пропускной способности энергетической инфраструктуры посредством управления электроподвижным составом исходя из режимов работы системы тягового электроснабжения железных дорог в реальном времени. В статье предложен алгоритм управления электроподвижным составом за счет изменения потребляемой мощности с учетом режимов работы и ограничений координированно с регуляторами системы тягового электроснабжения железных дорог в реальном времени. Управляющие воздействия на снижение мощности электротяговой нагрузки могут быть получены путем численного моделирования на основе расчетной схемы или прямого решения системы уравнений, описывающих токи и напряжения в межподстанционной зоне системы тягового электроснабжения. В результате расчетов для одного момента времени получена величина снижения мощности электротяговой нагрузки в контексте приоритета для выполнения ограничений по загрузке фидеров контактной сети по току и обеспечения напряжений в тяговой сети в допустимых пределах. Достоверность итогов моделирования подтверждается сходимостью полученных результатов расчета режимов электрифицированного участка и экспериментальных данных. Реализация предлагаемого подхода позволит повысить пропускную способность электрифицированного участка за счет повышения надежности электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения железных дорог из-за исключения ненормальных режимов их работы. Представленная технология определения управляющих воздействий для электроподвижного состава с учетом взаимной координации и приоритета при превышении допустимых пределов параметров энергетической инфраструктуры практически осуществима и может применяться в рамках «виртуальной сцепки».

Ключевые слова

электроподвижной состав, система тягового электроснабжения, управление спросом, пропускная способность, режимы работы, мгновенная нагрузка

Для цитирования

Денисов И.Н. Управление электроподвижным составом с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения железных дорог / И.Н. Денисов, Е.А. Третьяков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 10–19. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).10-19.

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 04.09.2024 г.; принята к публикации: 05.09.2024 г.

Control of electric rolling stock taking into account operation modes of railway traction power supply system

I.N. Denisov, E.A. Tret'yakov✉

Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

✉eugentr@mail.ru

Abstract

The development of digital technologies in railway transport makes it possible to overcome a number of technological barriers associated with the limited capacity of the energy infrastructure by controlling electric rolling stock taking into account the operating modes of the railway traction power supply system in real time. The paper proposes an algorithm for controlling electric rolling stock in terms of changing the consumed power taking into account the operating modes, restrictions and in coordination with the regulators of the railway traction power supply system in real time. Control influence on the power reduction of the electric traction load can be obtained by numerical modeling based on a calculation scheme or a direct solution to a system of equations describing currents and voltages in the inter-substation zone of the traction power supply system. As a result of calculations for a single point in time, the value of the reduction in the power of the electric traction load was obtained taking into account the priority for fulfilling restrictions on the loading of contact network feeders by current and ensuring voltages in the traction network within acceptable limits. The reliability of the modeling results is confirmed by the convergence of the obtained results of calculating the modes of the electrified section with the experimental data. The implementation of the proposed approach will increase the capacity of the electrified section by increasing the reliability of the electric rolling stock and the traction power sup-

ply system of the railways due to the exclusion of abnormal modes of their operation. The presented technology for determining control actions for electric rolling stock taking into account mutual coordination and priority when exceeding the permissible limits of the parameters of the energy infrastructure is practically feasible and can be used within the framework of the «virtual coupling».

Keywords

electric rolling stock, traction power supply system, demand management, bandwidth, operating modes, instant loading

For citation

Denisov I.N., Tret'yakov E.A. Upravlenie elektropodvizhnym sostavom s uchetom rezhimov raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznikh dorog [Control of electric rolling stock taking into account operation modes of railway traction power supply system]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 10–19. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).10-19.

Article Info

Received: April 15, 2024; Revised: September 4, 2024; Accepted: September 5, 2024.

Введение

Развитие цифровых технологий на железнодорожном транспорте позволяет создать возможность преодоления ряда технологических барьеров, связанных с ограничением пропускной способности энергетической инфраструктуры за счет управления электроподвижным составом (ЭПС) с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения (СТЭ) железных дорог в реальном времени.

В настоящее время график движения поездов формируется на основе тяговых расчетов [1] по требованиям ГОСТ 57670-2017 [2]. При этом не принимаются во внимание фактические параметры режимов СТЭ, например мгновенные значения токов в тяговой сети, загрузка силовых трансформаторов и преобразователей тяговых подстанций, напряжения на токоприемнике ЭПС и ряд других. Аналогично не учитываются фактические токи, мощности ЭПС в реальных условиях эксплуатации. Отсутствует координация между соседними поездами по электрическим параметрам в условиях ограничений энергетической инфраструктуры. В свою очередь, регуляторы СТЭ не учитывают местоположение ЭПС, режимы их работы для обеспечения функционирования транспортного комплекса как единой кибернетической системы.

Реализация технологии «виртуальная сцепка» [3–5] может в ряде случаев ограничиваться возможностью выхода токов и напряжений в тяговой сети за допустимые пределы, особенно когда отсутствует их мониторинг в реальном времени.

Согласно Стратегии научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и перспективу до 2030 г. [6], перспективными технологиями являются автоматическое опре-

деление ограничений по потребляемой мощности с учетом складывающейся поездной обстановки на основе проведения оценочных тяговых расчетов в режиме реального времени и поддержки принятия оптимальных решений диспетчерским персоналом по организации пропуска поездов на участках.

Таким образом, управление ЭПС с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения железных дорог представляется актуальным, имеет потенциал развития и требует дальнейших научных исследований.

Целью данной работы является обоснование подходов к управлению магистральными электровозами на межподстанционной зоне с учетом ограничений СТЭ.

Основные решаемые задачи:

- выполнить обзор основных публикаций по указанной проблематике;
- предложить алгоритм определения энергетических ограничений для магистральных электровозов с учетом их приоритета в реальном времени;
- выполнить численное моделирование управления магистральными электровозами на межподстанционной зоне с учетом ограничений СТЭ.

В работах [7, 8] авторы предлагают воздействовать на электровоз в сторону уменьшения скорости поезда и увеличения межпоездного интервала для снижения загрузки электрооборудования тяговых подстанций и обеспечения энергосбережения. В целом представленный подход является известным и широко применяется при реализации технологии управления спросом промышленных и бытовых нагрузок в рамках ценозависимого электропотребления [9].

Принципов и методов реализации технологии управления спросом электротяговыми нагрузками с контролем мгновенных значений электрических параметров в реальном времени в опубликованных работах не представлено.

Совместимость параметров режимов ЭПС и регуляторов СТЭ позволит повысить надежность перевозочного процесса, снизить количество неплановых остановок поездов и в полной мере реализовать технологии типа «виртуальная сцепка» по фактическим, а не расчетным условиям эксплуатации.

Управление регуляторами СТЭ с учетом информации о местоположении, тягово-энергетических параметрах ЭПС в реальном времени существенно повысит эффективность их работы. Функционирование устройств релейной защиты системы электроснабжения железных дорог и ЭПС как единой кибернетической системы позволит повысить надежность перевозочного процесса.

Общий порядок реализации предлагаемого подхода к корректировке мощности электротяговых нагрузок и выработке мощности регуляторами энергетической инфраструктуры следующий:

1. Измерение бортовыми системами параметров электровоза (электропоезда), а также

электрических параметров СТЭ, синхронизированное по времени.

2. Расчет коэффициентов влияния электротяговых нагрузок друг на друга и на систему электроснабжения железных дорог.

3. Определение управляющих воздействий для ЭПС и регуляторов СТЭ в части приращений активной / реактивной мощности; перерасчет указанных управляющих воздействий в необходимый режим (тяга, торможение, выбег), позицию, силу тяги / торможения, которые соответствуют заданным ограничениям энергетической инфраструктуры.

4. Преобразование указанных воздействий в откорректированные графики движения поездов (ограничения движения) и их передача на бортовые системы ЭПС для исполнения в реальном времени.

Структурная схема взаимодействия элементов транспортной системы как единое целое представлена на рис. 1.

Обработку данных измерений ЭПС и оценку влияния на СТЭ целесообразно выполнять бортовыми вычислительными средствами, что сократит объем передаваемой информации. Расчет управляющих воздействий на ЭПС и регуляторы СТЭ выполняется в центре управления движением поездов.

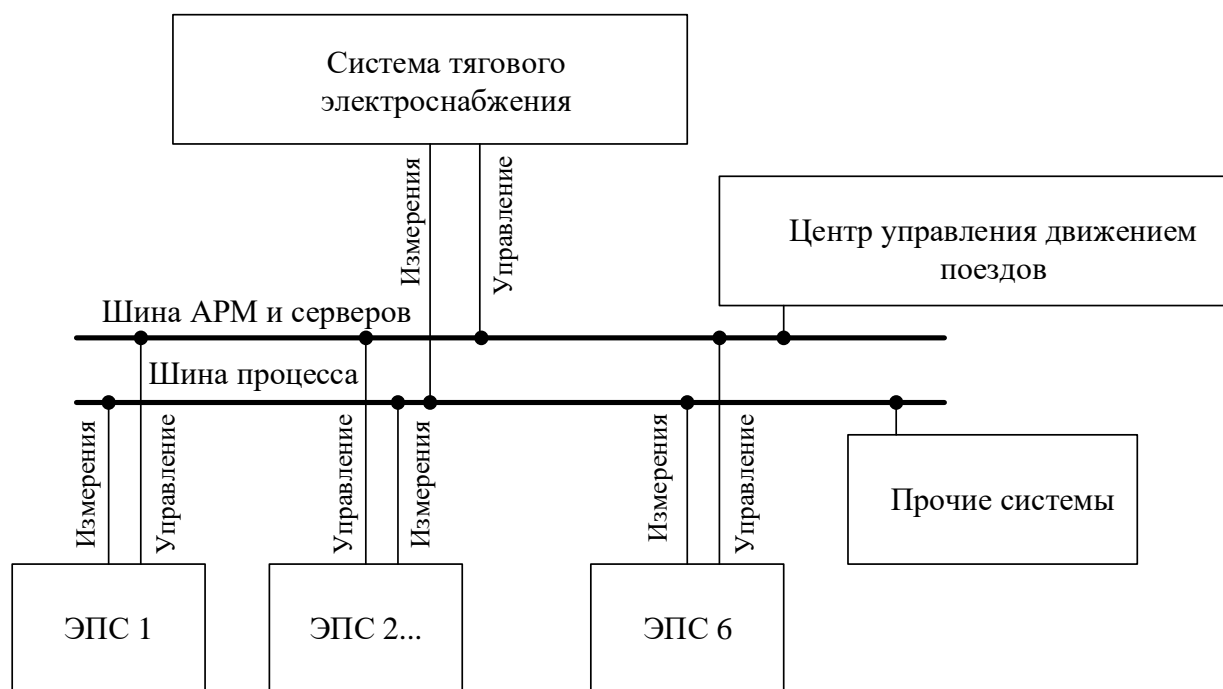


Рис. 1. Блок-схема информационных потоков при управлении электроподвижным составом

Fig. 1. Block diagram of information flows while controlling of electric rolling stock

В перспективе информационно-управляющая система должна управлять электротяговыми нагрузками и регуляторами системы электроснабжения железных дорог (регуляторы напряжения, устройств компенсации реактивной мощности, накопителей, секционирования контактной сети) как единой транспортной системой, во взаимосвязи. Координированное управление всеми регуляторами и ЭПС представляет собой в достаточной степени сложную научно-техническую задачу.

Предлагаемый алгоритм управления электроподвижным составом с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения

железных дорог в реальном времени представлен на рис. 2.

Расчет влияния по электрическим параметрам ЭПС друг на друга и на систему электроснабжения железных дорог в границах рассматриваемого участка осуществляется на основе математической модели системы электроснабжения железных дорог с электротяговыми нагрузками.

Напряжение независимых узлов в схеме замещения определяются по выражению:

$$U_i = Y_{ij}^{-1} (I_i - M_j Y_p) E_p,$$

где Y_{ij} – матрица узловых проводимостей, См;

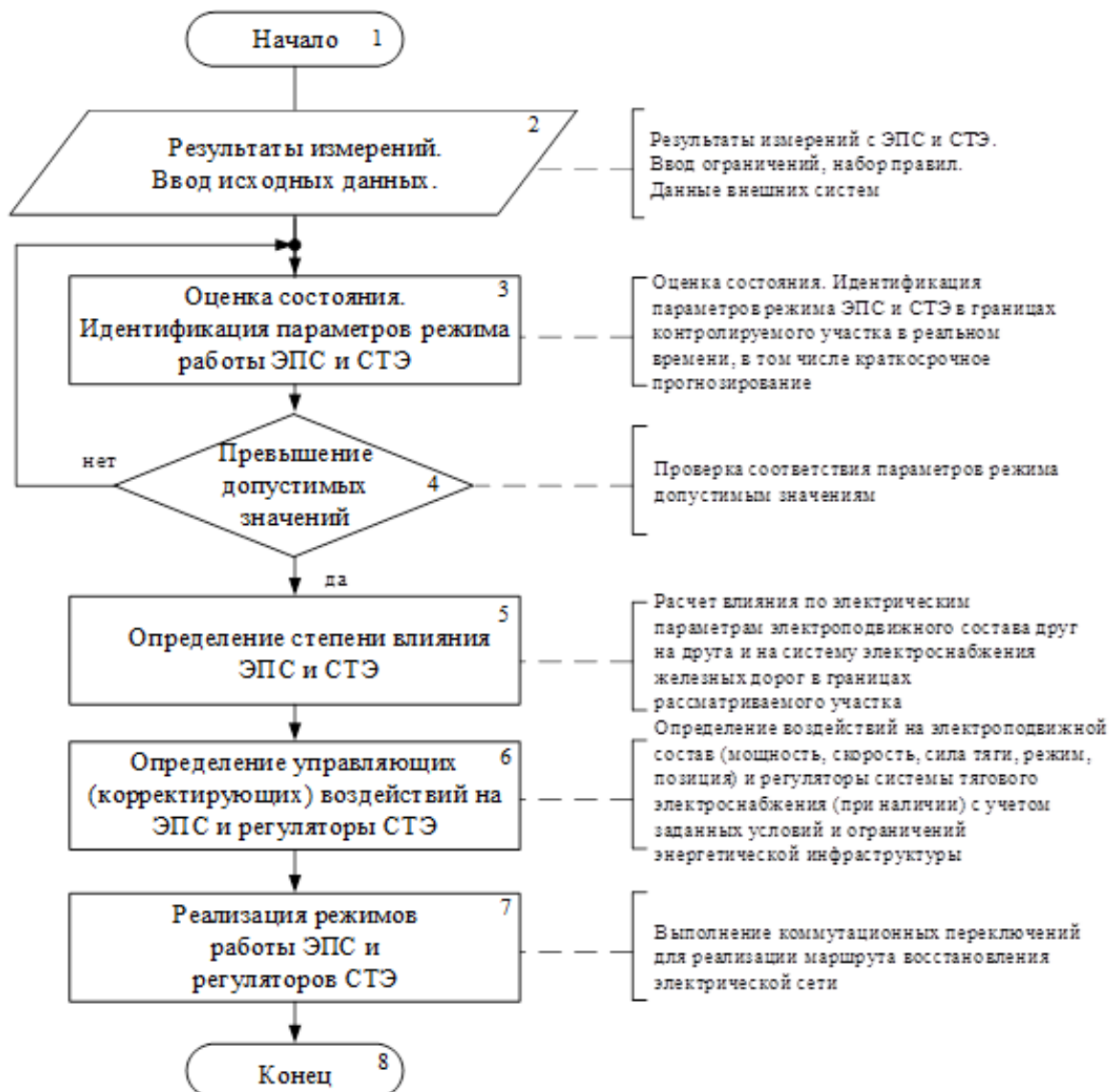


Рис. 2. Алгоритм управления электроподвижным составом с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения железных дорог в реальном времени

Fig. 2. Algorithm for controlling electric rolling stock taking into account the operating modes of the traction power supply system of railways in real time

I_i – столбец заданных токов в узлах, А; M_j – матрица соединений; Y_p – матрица проводимостей ветвей, См; E_p – столбец заданных ЭДС ветвей, В [10].

В нелинейной форме параметры электрической сети могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} U_i \sum_{j=0}^{n-1} Y_{ij} U_j \cos(\delta_i - \delta_j - \psi_{ij}) = P_i; \\ U_i \sum_{j=0}^{n-1} Y_{ij} U_j \sin(\delta_i - \delta_j - \psi_{ij}) = Q_i, \end{cases}$$

где δ_i , δ_j , ψ_{ij} – углы комплексного напряжения [10].

Расчетная схема замещения межподстанционной зоны СТЭ 25 кВ представлена на рис. 3. Электротяговая нагрузка задается в виде полных мощностей $S_i = P_i + Q_i$.

На схеме замещения показаны собственные сопротивления эквивалентных контактных сетей путей и питающих проводов Z_1, Z_2, \dots, Z_{20} [2].

Влияние электротяговых нагрузок друг на друга и СТЭ может быть выполнена на основе сенсорного анализа [11, 12] путем применения метода приращений. Указанное влияние в рамках решаемых задач оценивается по напряжению и полному току в элементах расчетной схемы.

Коэффициент влияния j -й электротяговой нагрузки на напряжение в i -м узле при дис-

кретных мгновенных измерениях действующих значений, В/кВ · А:

$$K_{U_{ij}} = \frac{\Delta U_i}{\Delta S_j},$$

где ΔU_i – приращение напряжения в i -м узле, обусловленное малым приращением нагрузки ΔS_j .

Коэффициент влияния j -й электротяговой нагрузки на ток в p -й ветви расчетной схемы замещения, А/кВ · А:

$$K_{I_{pj}} = \frac{\Delta I_p}{\Delta S_j},$$

где ΔI_p – приращение тока в p -й ветви, обусловленное малым приращением нагрузки ΔS_j .

Указанные приращения могут быть получены путем численного моделирования на основе расчетной схемы или прямого решения системы уравнений, описывающих токи и напряжения в межподстанционной зоне СТЭ.

С участием авторов проведен эксперимент на железной дороге переменного тока с фиксацией синхронизированных измерений электрических параметров двух электровозов и фидеров тяговых подстанций, питающих межподстанционную зону двухпутного участка.

Достоверность полученных результатов подтверждается верификацией математической модели и данных измерений. Фактическая

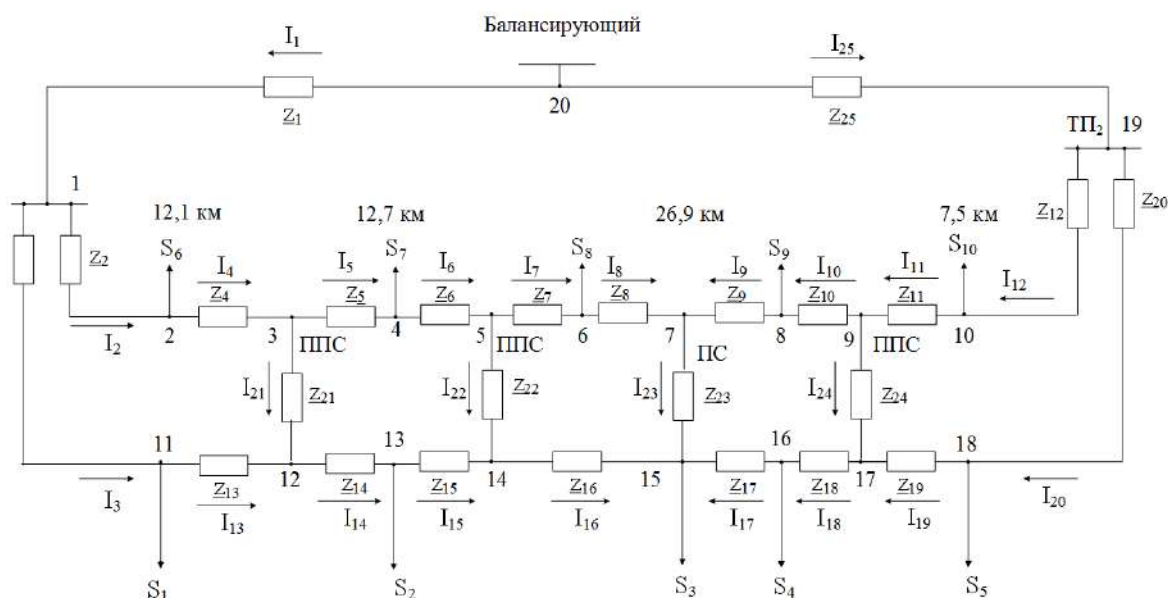


Рис. 3. Мгновенная расчетная схема замещения межподстанционной зоны системы тягового электроснабжения 25 кВ

Fig. 3. Instantaneous equivalent circuit design of the inter-substation zone of the 25 kV traction power supply system

электротяговая нагрузка задавалась в математическую модель и определялись напряжения в узлах расчетной электрической схемы. Полученные в результате расчета значения напряжений сравнивались с измеренными в реальных условиях. Расхождение не превышало 4 %.

Расчет коэффициентов K_U , K_I осуществляется на основе схемы замещения (см. рис. 3) и реальных электротяговых нагрузок с учетом их местоположения.

В режиме рекуперации указанный коэффициент может принимать отрицательные значения.

На рис. 4 представлены значения коэффициентов K_U , K_I для расчетной мгновенной схемы.

Мощность электротяговой нагрузки складывается из мощности тяговой нагрузки и собственных нужд ЭПС.

В случае ограничений, накладываемых на ЭПС по мощности, необходимо обеспечить заданный режим, позицию, а в некоторых случаях изменение скорости движения поезда, для чего требуется выполнить тяговый расчет с

учетом местоположения поезда на профиле пути с краткосрочным прогнозом. Метод расчета силы тяги, тока, мощности ЭПС при любой позиции регулирования силы тяги, используемый в расчетах, принимался согласно [2].

Математическая модель управления электротяговыми нагрузками с учетом режимов работы СТЭ может быть представлена в виде:

$$\sum_{j=1}^m \Delta S_j (1 - k_{gj}) + \sum_{l=1}^n \Delta S_l (1 - k_{gl}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

при ограничениях:

– по напряжению в контактной сети –

$$\sum_{j=1}^m \Delta S_j K_{U_{ij}} + \sum_{l=1}^n \Delta S_l K_{U_{lj}} \geq \Delta U_i, \quad (2)$$

$$\Delta U_i = U_{\text{доп}} - U_i;$$

– по току линий СТЭ, включая питающие фидера –

$$\sum_{j=1}^m \Delta S_j K_{I_{pj}} + \sum_{l=1}^n \Delta S_l K_{I_{lj}} = \Delta I_p, \quad (3)$$

$$\Delta I_p = I_p - I_{\text{рдоп}};$$

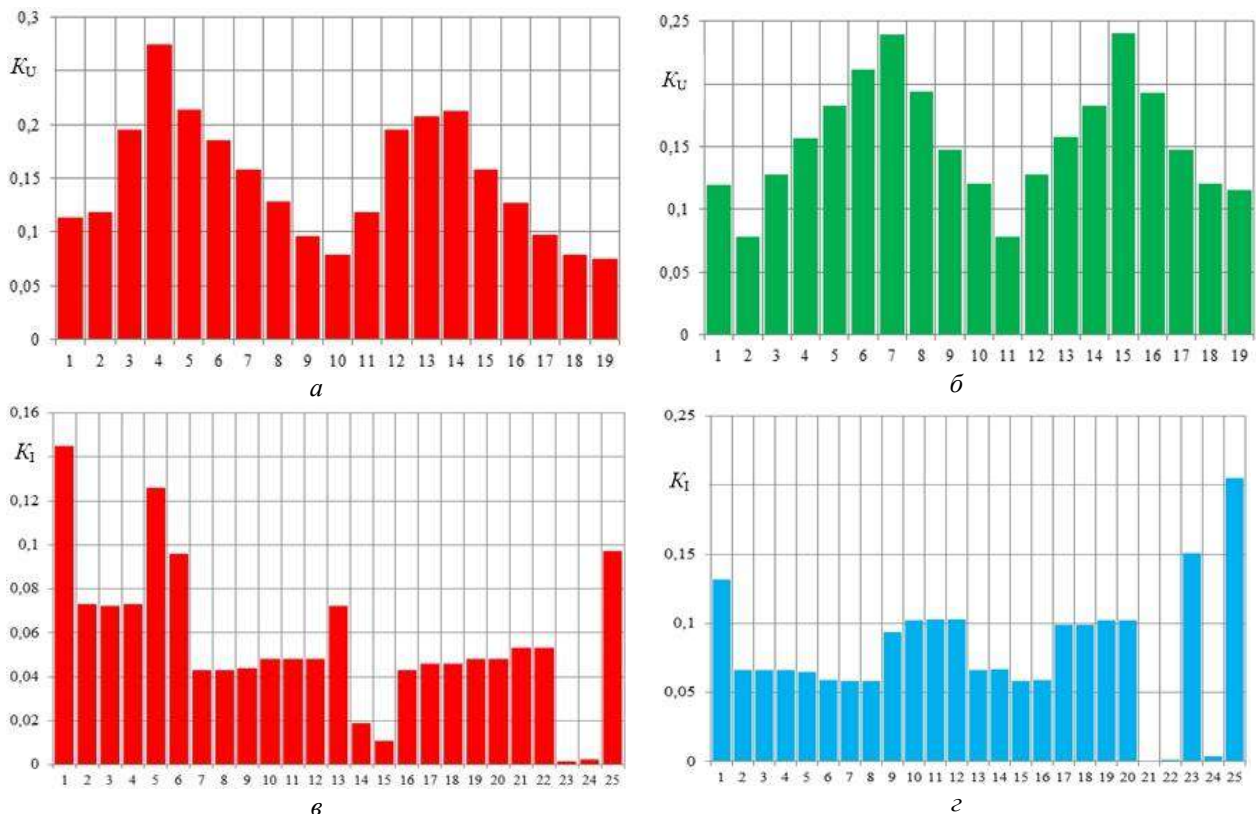


Рис. 4. Коэффициенты влияния K_U , K_I :
 а, в – при изменении нагрузки S_7 ; б, г – при изменении нагрузки S_4

Fig. 4. Influence coefficients K_U , K_I :

а, в – with the load changes S_7 ; б, г – with the load changes S_4

– прочие:

$$\Delta S_l \leq \Delta S_{lmax}; 0 < \Delta S_j \leq S_j;$$

$$k_{gj}, k_{gl}, K_{Uij}, K_{Ulj}, K_{Ipj}, K_{Iij} \in (0, 1).$$

$$\Delta S_l \leq \Delta S_{lmax}; 0 < \Delta S_j \leq S_j;$$

$$k_{gj}, k_{gl}, K_{Uij}, K_{Ulj}, K_{Ipj}, K_{Iij} \in (0...1).$$

где ΔS_j – приращение (снижение) j -й электротяговой нагрузки (без учета рекуперации); ΔS_l – приращение мощности l -го регулятора СТЭ (при наличии); k_{gj}, k_{gl} – коэффициент приоритета для электроподвижного состава и регуляторов СТЭ.

Согласно представленной оптимизационной модели (1) определяются управляющие воздействия на снижение мощности электротяговых нагрузок и (или) генерацию реактивной и активной (при наличии) мощности регуляторов СТЭ, которые обеспечивают условия исключения перегрузки линий ΔI_p и снижения напряжения в контактной сети ниже допустимого $\Delta U_i = U_{iдоп} - U_i$.

Таким образом, предполагается, что управляющие воздействия на ЭПС и регуляторы СТЭ (при наличии) будут реализовываться только при перегрузке линий (фидеров) или снижении напряжения в контактной сети ниже допустимой или высокой вероятности наступления такой ситуации (на основе краткосрочного прогноза).

Допустимые значения токов и напряжений в СТЭ принимаются по [2] или заданным эксплуатационным условиям.

Задание коэффициентов приоритета позволяет ранжировать важность электротяговых нагрузок в произвольный момент времени, обеспечивая возможность поддержания исходных графиков движения ответственных поездов, напримердвигающихся по технологии «виртуальная сцепка».

Управление электротяговыми нагрузками и регуляторами СТЭ (при наличии) среди прочего [13–15] может быть реализовано с помощью мультиагентной системы управления [16–18], которая позволяет использовать принцип самоорганизации. В изменяющихся условиях поездной обстановки, если часть электротяговой нагрузки не может принять участие в стабилизации напряжения (снижении загрузки), то для выполнения условий (2) и (3), будут задействованы оставшиеся нагрузки (регуляторы), обеспечивая адаптивность управляющей системы, т.е. самоорганизацию.

Как известно [2], допустимые минимальные значения токов на токоприемнике ЭПС в эксплуатационных режимах, а также нормы допустимых перегрузок по току задаются по времени усреднения. Поэтому при расчете прогнозных параметров перегрузок по току или снижения напряжения на токоприемнике ЭПС ниже допустимого в процессе движения поезда, а также для определения реализации управляющих воздействий на ЭПС и регуляторы СТЭ (при наличии) необходимо учитывать время выхода параметров за установленные пределы.

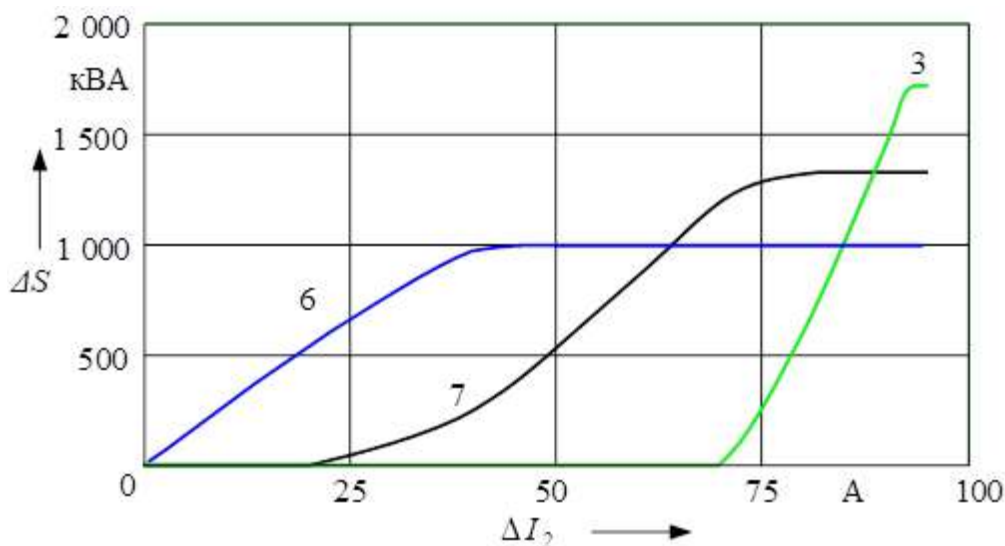


Рис. 5. Расчетные значения снижения мощности электротяговых нагрузок $\Delta S_6, \Delta S_7, \Delta S_3$ с учетом установленных ограничений для снижения перегрузки линии (фидера)

Fig. 5. Estimated values $\Delta S_6, \Delta S_7, \Delta S_3$ for reducing the power of electric traction loads, taking into account the established restrictions to reduce line (feeder) overload

Степень влияния электротяговых нагрузок на параметры режима энергетической инфраструктуры зависит от местоположения электроподвижного состава и изменяется в процессе движения поезда. На рис. 5 представлены расчетные значения снижения мощности электротяговых нагрузок $\Delta S_6, \Delta S_7, \Delta S_3$ с учетом установленных ограничений для снижения перегрузки линии (фидера) ΔI_2 выше допустимых значений в соответствии с условием (3) для одного момента времени расчетной схемы.

Параметры движения поездов, которые подпадают под управление, корректируются на основе расчетного снижения электротяговых нагрузок в конкретный момент времени и последующего тягового расчета режима, силы тяги, позиции ЭПС с учетом предыдущего состояния.

С практической точки зрения для обеспечения максимально возможной пропускной способности электрифицированного участка железной дороги в условиях ограничений СТЭ необходимо брать в расчет реальную поездную обстановку, включая возможность использования потенциальной и кинетической энергий поезда, что учитывается представленными коэффициентами приоритета ЭПС. Также на перегоне в ряде случаев возможно в ограниченных пределах изменять межпоездной интервал (динамически), не снижая пропускную способность участка.

Заключение

Предложен алгоритм управления ЭПС в части изменения потребляемой мощности с учетом режимов работы, ограничений и ко-

ординированно с регуляторами СТЭ в реальном времени.

Управляющие воздействия на снижение мощности электротяговой нагрузки могут быть получены путем численного моделирования на основе расчетной схемы или прямого решения системы уравнений, описывающих токи и напряжения в межподстанционной зоне СТЭ.

В результате расчетов для одного момента времени получена величина снижения мощности электротяговой нагрузки с учетом приоритета для выполнения ограничений по загрузке фидеров контактной сети по току и обеспечению напряжений в тяговой сети в допустимых пределах.

Достоверность результатов моделирования подтверждается сходимостью полученных результатов расчета режимов электрифицированного участка и экспериментальных данных.

Реализация предлагаемого подхода позволит повысить пропускную способность электрифицированного участка за счет повышения надежности ЭПС и СТЭ из-за исключения недопустимых режимов их работы.

Технология определения управляющих воздействий для ЭПС с учетом взаимной координации и приоритета при превышении допустимых пределов параметров энергетической инфраструктуры практически реализуема и может применяться в рамках «виртуальной сцепки».

Координация режимов работы ЭПС и регуляторов СТЭ в рассматриваемом контексте может быть реализована в ближайшем будущем и является актуальной.

Список литературы

1. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы : распоряжение ОАО «РЖД» № 867р от 12.05.2016 (ред. 05.12.2023). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
2. ГОСТ Р 57670-2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. Введ. : 2018–05–01. М. : Стандартинформ, 2017. 52 с.
3. «Виртуальная сцепка» на Восточном полигоне: достигнутые эффекты и направления развития / А.И. Долгий, А.Г. Сахаров, М.А. Дежков и др. // Транспорт Российской Федерации. 2023. № 5-6 (108-109). С. 15–19.
4. Бушуев С.В., Гундырев К.В., Голочалов Н.С. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки // Автоматика на транспорте. 2021. Т. 7. № 1. С. 1–20.
5. Развитие технологий интервального регулирования движения поездов: итоги и перспективы / В.Е. Андреев, А.В. Пронкин, А.И. Долгий и др. // Транспорт Российской Федерации. 2023. № 1-2 (104-105). С. 6–12.
6. Об утверждении стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : распоряжение ОАО «РЖД» № 769/р от 17.04.2018. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
7. Development of a Train Operation Power Simulator Using the Interaction between the Power Supply Network, Rolling Stock Characteristics and Driving Patterns, as Conditions / Y. Takeuchi, T. Ogawa, H. Morimoto et al. // Quarterly Report of RTRI. 2017. Vol. 58. Iss. 2. P. 98–104.

8. Пат. № 2629622 РФ. Система для контроля и регулирования мощности и энергии, расходуемой транспортной системой / В.А. Вербицкий, К.Г. Кисельгоф, И.О. Набойченко и др. № 2016116551 ; заявл. 27.04.2016 ; опублик. 30.08.2017, Бюл. № 25. 13 с.
9. Катыхин А. И., Нехороших И. Н. Разработка метода управления спросом на электроэнергию // Естественные и технические науки. 2019. № 4 (130). С. 190–193.
10. Mathematical model of the static reactive power compensator / T.R. Khramshin, G.P. Kornilov, A.A. Murzikov et al. // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov, 2014. DOI 10.1109/APEDE.2014.6958287.
11. Стельмашенко А.В. Математическая модель для исследования влияния напряжения в контактной сети на процесс движения поездов // Актуальные проблемы железнодорожной науки глазами молодых исследователей : сб. материалов круглого стола, посвящ. Дню железнодорожника. М., 2022. С. 156–161.
12. Гамм А.З., Голуб И.И., Бершанский Р.В. Эффективный метод определения слабых связей в электроэнергетической системе // Электричество. 2010. № 9. С. 31–37.
13. Coordinated voltage control of wind-penetrated power systems via state feedback control / H. Yassami, F. Bayat, A. Jalilvand et al. // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2017. Vol. 93. P. 384–394. DOI 10.1016/j.ijepes.2017.06.014.
14. Novak H., Lešić V., Vašak M. Hierarchical Model Predictive Control for Coordinated Electric Railway Traction System Energy Management // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2019. Vol. 20. Iss. 2. P. 2715–2727. DOI 10.1109/TITS.2018.2882087.
15. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, В.А. Ушаков и др. Иркутск : ИРГУПС, 2012. 129 с.
16. Малыгина М.П., Герасимов Д.А. Мультиагентные системы искусственного интеллекта // Научные труды КубГТУ. 2018. № 3. С. 476–484.
17. Пшенокова И.А., Анчечков М.И., Макоева Д.Г. Архитектура мультиагентной когнитивной системы процесса принятия решений в интеллектуальных средах обитания // Изв. Кавардино-Балкар. науч. центра РАН. 2018. № 4 (84). С. 28–32.
18. Баранов Л.А., Сафронов А.И., Сидоренко В.Г. Планирование движения поездов в интеллектуальных транспортных системах // Надежность. 2022. Т. 22. № 3. С. 35–43.

References

1. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 867r ot 12.05.2016 «Ob utverzhdenii pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» (red. 05.12.2023) [Order of JSC «Russian Railways» No. 867r dated May 12, 2016 «On approval of the rules of traction calculations for train operation» (ed. December 5, 2023)].
2. GOST R 57670-2017. Sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoi dorogi. Metodika vybora osnovnykh parametrov [State Standard R 57670-2017. The railway track power supply systems. The methods of selecting fundamental parameters]. Moscow: Standartinform Publ., 2017. 52 p.
3. Dolgii A.I., Sakharov A.G., Dezhkov M.A., Makievskii S.A., Chernin M.A. «Virtual'naya stseпка» na Vostochnom poligone: dostignutyie efekty i napravleniya razvitiya [«Virtual coupling» at the Eastern polygon: achieved effects and development directions]. *Transport Rossiiskoi Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2023, no. 5-6 (108-109), pp. 15–19.
4. Bushuev S.V., Gundyrev K.V., Golochalov N.S. Povyshenie propusknoi sposobnosti uchastka zheleznoi dorogi s primeneniem tekhnologii virtual'noi stseпки [Increasing the throughput capacity of a railway section using virtual coupling technology]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2021, vol. 7, no. 1, pp. 1–20.
5. Andreev V.E., Pronkin A.V., Dolgii A.I., Rosenberg E.N. Razvitiie tekhnologii interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov: itogi i perspektivy [Development of technologies for interval regulation of train traffic: results and prospects]. *Transport Rossiiskoi Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2023, no. 1-2 (104-105), pp. 6–12.
6. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 769/r ot 17.04.2018 «Ob utverzhdenii strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga)» [Order of JSC «Russian Railways» No 769/r dated April 17, 2018 «On approval of the strategy of scientific and technological development of the Russian Railways Holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book)»].
7. Takeuchi Y., Ogawa T., Morimoto H., Imamura Y., Minobe S., Sugimoto S. Development of a Train Operation Power Simulator Using the Interaction between the Power Supply Network, Rolling Stock Characteristics and Driving Patterns, as Conditions. *QR of RTRI*, 2017, vol. 58, iss. 2, pp. 98–104.
8. Verbitskii V.A., Kisel'gof K.G., Naboichenko I.O., Rakov V.V., Rozenberg E.N., Rozenberg I.N., Shurdak A.V. Patent RU 2629622 C1, 30.08.2017.
9. Katelykhin A.I., Nekhoroshikh I.N. Razrabotka metoda upravleniya sprosom na elektroenergiyu [Development of a method for managing electricity demand]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and technical sciences], 2019, no. 4 (130), pp. 190–193.
10. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandayev A.S., Khramshin V.R. Mathematical model of the static reactive power compensator. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, 2014. DOI 10.1109/APEDE.2014.6958287.
11. Stel'mashenko A.V. Matematicheskaya model' dlya issledovaniya vliyaniya napryazheniya v kontaktnoi seti na protsess dvizheniya poezdov [Mathematical model for studying the influence of voltage in the contact network on the process of train movement]. *Sbornik materialov kruglogo stola, posvyashchennogo Dnyu zheleznodorozhnika «Aktual'nye problemy zheleznodorozhnoi nauki glazami molodykh issledovatelei»* [Proceedings of the round table dedicated to the Railway Worker's Day «Current problems of railway science through the eyes of young researchers»]. Moscow, 2022, pp. 156–161.

12. Gamm A.Z., Golub I.I., Bershanskii R.V. Effektivnyi metod opredeleniya slabykh svyazei v elektroenergeticheskoi sisteme [An effective method for determining weak connections in the electrical power system]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2010, no. 9, pp. 31–37.
13. Yassami H., Bayat F., Jalilvand A., Rabiee A. Coordinated voltage control of wind-penetrated power systems via state feedback control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, vol. 93, pp. 384–394. DOI 10.1016/j.ijepes.2017.06.014.
14. Novak H., Lešić V., Vašak M. Hierarchical Model Predictive Control for Coordinated Electric Railway Traction System Energy Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, vol. 20, iss. 2, pp. 2715–2727. DOI 10.1109/TITS.2018.2882087.
15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Ushakov V.A., Alekseenko V.A. Operativnoe upravlenie v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Operational management in railway power supply systems]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2012. 129 p.
16. Malykhina M.P., Gerasimov D.A. Mul'tiagentnye sistemy iskusstvennogo intellekta [Multi-agent artificial intelligence systems]. *Nauchnye trudy KubGTU* [Proceedings of the Kuban State University of Technology], 2018, no. 3, pp. 476–484.
17. Pshenokova I.A., Anchekov M.I., Makoeva D.G. Arkhitektura mul'tiagentnoi kognitivnoi sistemy protsessa prinyatiya reshenii v intellektual'nykh sredakh obitaniya [Architecture of a multi-agent cognitive system of the decision-making process in intelligent living environments]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletins of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, no. 4 (84), pp. 28–32.
18. Baranov L.A., Safronov A.I., Sidorenko V.G. Planirovanie dvizheniya poezdov v intellektual'nykh transportnykh sistemakh [Planning train traffic in intelligent transport systems]. *Nadezhnost'* [Reliability], 2022, vol. 22, no. 3, pp. 35–43.

Информация об авторах

Денисов Илья Николаевич, преподаватель кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: idenisov89@mail.ru.

Третьяков Евгений Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: eugentr@mail.ru.

Information about the authors

Ilya N. Denisov, Lecturer of the Department of Rolling Stock Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: idenisov89@mail.ru.

Evgenii A. Tret'yakov, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: eugentr@mail.ru.

Предиктивная аналитика в планировании контингента монтеров пути в автоматизированных системах управления железнодорожным транспортом

Т.Н. Асалханова✉, А.А. Осколков

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

✉asalk-tatyana@yandex.ru

Резюме

Одним из важных показателей эффективности организации текущего содержания железнодорожного пути является качественное выполнение технологических процессов с соблюдением типовых норм времени. Путевые работы дистанций пути осуществляются исходя из показателей состояния верхнего строения пути, с учетом обеспечения безопасности движения и оптимальных затрат на содержание инфраструктуры. Планирование и организация путевых работ зависят прежде всего от основных участников технологических процессов – монтеров пути, соответствия их квалификации и разрядам для тех видов работ, которые должны выполняться. При этом планированием контингента рабочих занимаются специалисты дистанции пути и во многом от их знаний, профессионализма и умозаключений, которые они делают на основании отчетных данных из систем, зависит качество выполнения путевых работ. В статье рассматриваются вопросы планирования контингента монтеров пути для выполнения текущего содержания пути с учетом имеющихся проблем, а также возможность усовершенствования корпоративных автоматизированных систем за счет внедрения цифровых технологий – предиктивной аналитики, Big Data, машинного обучения. Планирование путевых работ производится в Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой на основании данных о движении кадров из Единой корпоративной автоматизированной системы управления трудовыми ресурсами. В системах возникают разногласия по разрядам монтеров пути, так как в последней формируется списочная численность рабочих без учета временных переводов. В результате в системах возникает разница между средним разрядом рабочих, в том числе и из-за того, что не реализованы инструменты расчета текучести кадров, прогнозирования движения и численности монтеров пути, что приводит к сложностям при планировании контингента, особенно на годовой период. Предиктивная аналитика в совокупности с математическими моделями неочевидных зависимостей, дескриптивного анализа позволит в указанных системах создать прогнозную аналитику движения контингента, выявить скрытые проблемы, которые могут влиять на эффективное планирование путевых работ.

Ключевые слова

дистанции пути, контингент, монтер пути, предиктивная аналитика, средний разряд работ, средний разряд работников, Единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой, Единая корпоративная автоматизированная система управления трудовыми ресурсами

Для цитирования

Асалханова Т.Н. Предиктивная аналитика в планировании контингента монтеров пути в автоматизированных системах управления железнодорожным транспортом / Т.Н. Асалханова, А.А. Осколков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 20–30. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).20-30.

Информация о статье

поступила в редакцию: 28.05.2024 г.; поступила после рецензирования: 06.09.2024 г.; принята к публикации: 09.09.2024 г.

Predictive analytics in the planning of a contingent of track fitters in automated railway transport management systems

T.N. Asalkhanova✉, A.A. Oskolkov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉asalk-tatyana@yandex.ru

Abstract

One of the important efficiency indicators in the organization of the current railway track maintenance is the high-quality execution of technological processes in compliance with typical time standards. Track work of the track distances is carried out based on the indicators of the track upper structure condition, taking into account traffic safety and optimal infrastructure maintenance costs. Planning and organizing of track work, first of all, depend on the main participants of technological processes that is the track fitters, their qualifications and categories for the types of work to be performed. At the same time, specialists of the distance of the track are engaged in planning the contingent of workers and, in many respects, the quality of the work depends on their

knowledge and qualifications, the conclusions they draw based on the reporting data from the systems. The article discusses the issues of planning a contingent of track fitters to fulfill the current content of the track, taking into account existing problems, as well as the possibility of improving corporate automated systems through the introduction of digital technologies – predictive analytics, big data, machine learning. The planning of track work is carried out in the unified corporate automated infrastructure management system based on data on the movement of personnel from the unified corporate automated human resource management system. There are disagreements in the systems on the categories of track fitters, because the list number of workers is taken into account in the unified corporate automated human resource management system, without taking into account temporary transfers. This results in a difference between the average category of workers in the systems, also due to the fact that tools for calculating staff turnover, forecasting traffic and the number of track fitters are not implemented, which leads to the complexity of contingent planning, especially for an annual period. Predictive analytics in combination with mathematical models of non-obvious dependencies and descriptive analysis will allow systems to create predictive analytics of contingent movement and identify hidden problems that can affect the effective planning of travel work.

Keywords

track distances, contingent, track fitter, predictive analytics, average category of work, average category of workers, Unified corporate automated infrastructure management system, Unified corporate automated human resource management system

For citation

Asalkhanova T.N., Oskolkov A.A. Prediktivnaya analitika v planirovani kontingenta monterov puti v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya zheleznodorozhnym transportom [Predictive analytics in the planning of a contingent of track fitters in automated railway transport management systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 20–30. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).20-30.

Article Info

Received: May 28, 2024; Revised: September 6, 2024; Accepted: September 9, 2024.

Введение

«Запускается третий этап расширения Восточного полигона железных дорог – БАМа и Транссиба... До 2030 года их пропускная способность возрастет со 173 до 210 миллионов тонн в год», – В.В. Путин [1].

В условиях реализации таких масштабных проектов в холдинге ОАО «РЖД» и, в частности на Восточном полигоне, возрастает спрос на содержание и обслуживание инфраструктурного комплекса, так как от тяжеловесных составов и их количества огромная нагрузка ложится на все элементы верхнего строения пути, что вызывает увеличение объемов путевых работ. От качества содержания инфраструктуры зависит не только внедрение крупномасштабных проектов холдинга, но и экономическая составляющая страны [2].

При возрастании объемов путевых работ на специалистов дистанций пути и службы пути возлагается огромная ответственность за планирование, организацию работ по текущему содержанию пути и качество выполнения технологических процессов. Необходимо заранее оценить потребности всех ресурсов не только на текущий момент, но и с учетом будущих объемов грузоперевозок, установления скоростей движения подвижного состава. И один из самых сложных процессов в планировании – это прогноз численно-

сти основных работников дистанции пути – монтеров пути [3].

В настоящее время аналитические процессы в разных корпоративных автоматизированных системах частично автоматизированы. Тем не менее специалистам дистанций пути приходится формировать отчеты из систем и вручную сравнивать показатели, что приводит к большим трудозатратам. На результаты анализа влияют опыт и квалификация работников, умение работать с данными из систем, соответственно, человеческий фактор может оказывать негативное воздействие на принятие управленческих решений [4].

Назрела необходимость внедрения современных инструментов предиктивной аналитики, больших данных, машинного обучения, искусственного интеллекта, нейросетей в корпоративные автоматизированные системы управления, которые позволят отойти от ручного труда, реализовать функции интеллектуального анализа данных (Data Mining), в том числе методы классификации, регрессии, кластеризации объектов (кластерный анализ персонала дистанции пути для выявления факторов текучести и эффективного использования кадров), установления последовательных паттернов (т.е. выявления типов поведения работников при различных производственных условиях) и анализа отклонений [5].

В компании накоплены огромные массивы информации об объемах путевых работ, движении персонала, квалификации рабочих в таких системах, как Единая корпоративная автоматизированная система управления трудовыми ресурсами (ЕК АСУТР), Единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой (ЕК АСУИ), корпоративное информационное хранилище данных (КИХ) и др., что послужит основанием для внедрения предиктивной аналитики, построения нейросети.

В ходе настоящего исследования и подготовки статьи поставлена цель – разработка алгоритма предиктивной аналитики для усовершенствования автоматизированных систем управления в части процесса планирования путевых работ с учетом особенностей реального наличия монтеров пути, обеспечивающего качественное выполнение технологических работ.

Постановка проблемы

В состав путевого хозяйства Центральной дирекции инфраструктуры (ЦДИ) входят 365 предприятий, в которых трудится более 128 тыс. чел. При этом работники обслуживают почти 184 тыс. км путей и более 82 тыс. искусственных сооружений. В структурных подразделениях путевого хозяйства холдинга с 2012–

2023 гг. наблюдается рост средней грузонапряженности с 34,1 млн т·км брутто до 39,8 (+ 5,7 млн т·км брутто, или 17 %) и увеличение протяженности главных путей со сверхнормативным пропущенным тоннажем и сроком эксплуатации (просрочки) с 20 541,9 км до 23 100 км (+ 2 558,1 км, или 12,5 %) [5].

Снижение списочной численности монтеров пути в ЦДИ за 11 лет составило 11 291 чел., что связано не только с естественным выбытием (пенсионный возраст, повышение, внутритранспортный перевод), но и с высокой текучестью кадров среди данной категории работников (рис. 1).

Текучесть монтеров пути часто объясняют сложными условиями труда (физические нагрузки, работа при любых метеоусловиях, часто отсутствие бытовых условий и т.п.), невысокой зарплатой, завышенными требованиями со стороны руководства дистанции пути, оптимизацией численности. Возможно, это и субъективный взгляд специалистов дистанций пути, так как в системе ЕК АСУТР учитываются только те причины увольнения, которые указывают монтеры пути в заявлениях. В системе существует систематизация причин увольнения, но недостаточная классификация и отсутствуют методы машинного обучения – кластерный анализ факторов мотивации данной

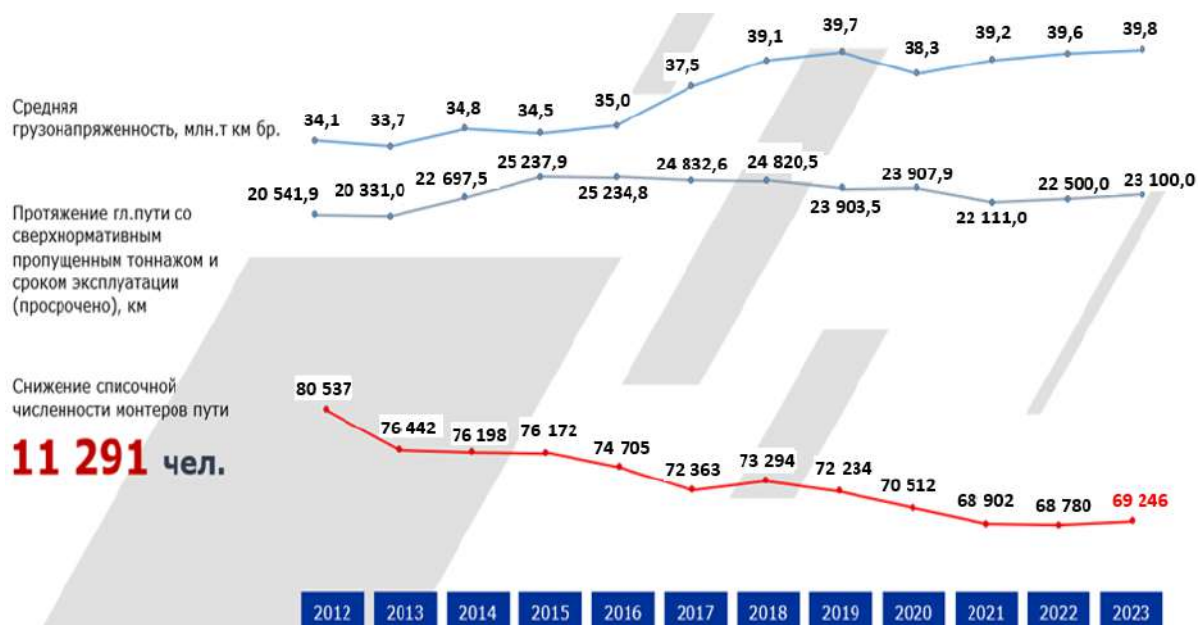


Рис. 1. Соотношение снижения численности монтеров пути к техническому состоянию пути по Центральной дирекции инфраструктуры в 2012–2023 гг.

Fig. 1. The ratio of the decrease in the number of track fitters to the technical condition of the track according to the Central Infrastructure Directorate in 2012–2023

категории работников, отсутствуют прогнозы текучести кадров.

В Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры (ВС ДИ) снижение численности монтеров пути с 2011 по 2023 г. составило 291 чел. (рис. 2) [6].

Несмотря на снижение численности, количество рабочих заданий, зафиксированных в системе ЕК АСУИ, увеличилось почти в 2 раза (рис. 3).

Расчет нормативной численности монтеров пути на текущее содержание пути осуществляется ежегодно в соответствии с норма-

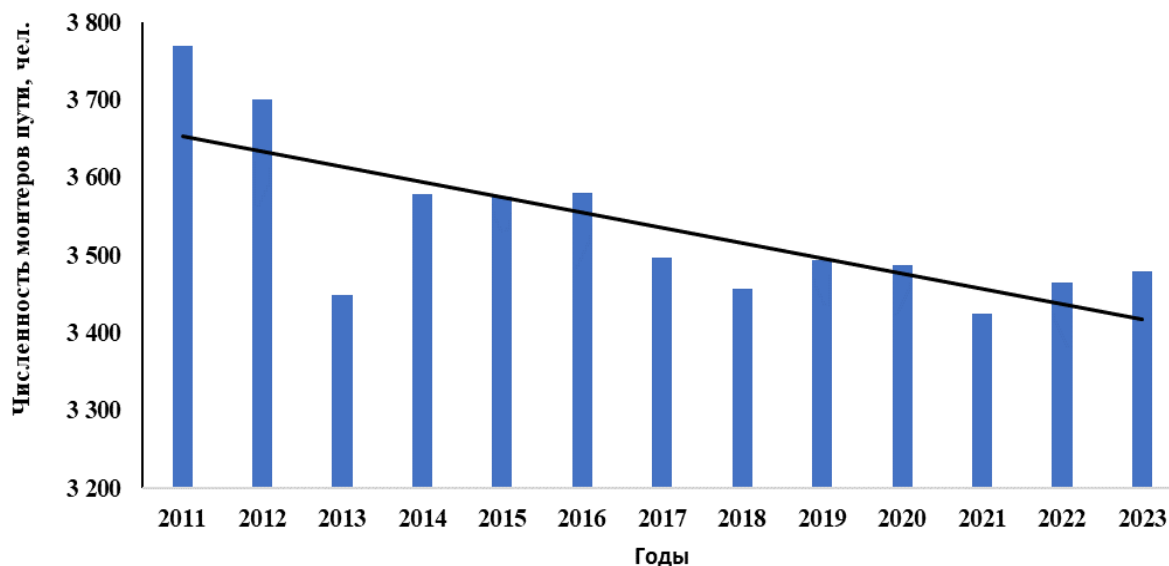


Рис. 2. Снижение численности монтеров пути в Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры с 2011 по 2023 г.

Fig. 2. Decrease in the number of track fitters in the East Siberian Infrastructure Directorate from 2011 to 2023

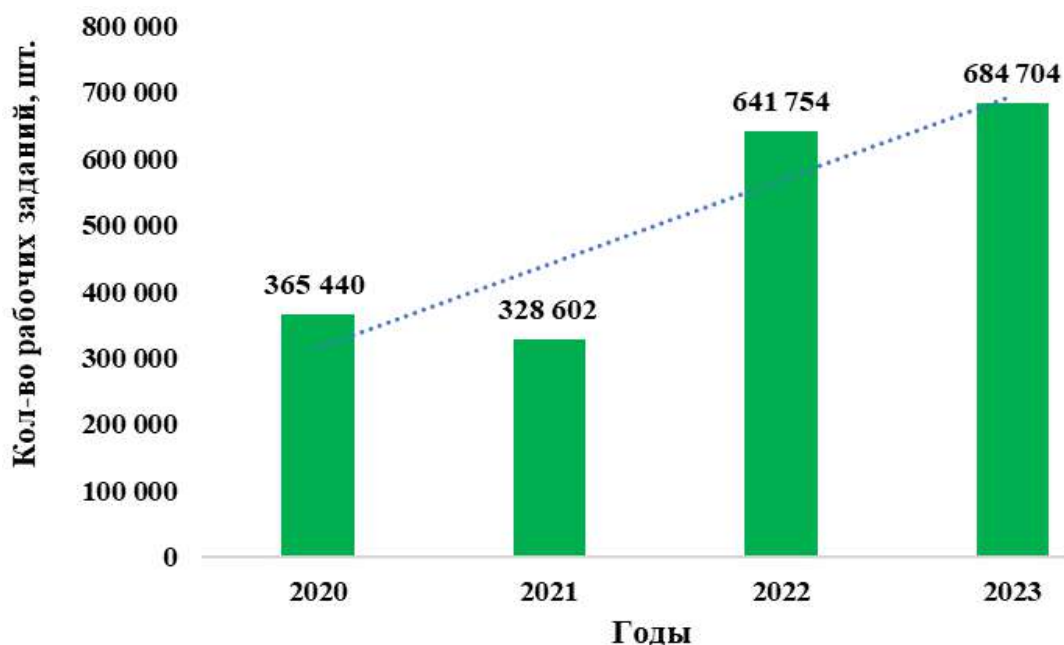


Рис. 3. Рост количества рабочих заданий в Единой корпоративной автоматизированной системе Управления инфраструктурой в дистанциях пути Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры

Fig. 3. The increase in the number of work assignments in the Unified corporate automated infrastructure management system in the distances of the track of the East Siberian Infrastructure Directorate

тивными документами холдинга. Рассчитываемая численность для каждого участка дистанции пути производится по нормам в зависимости от класса пути, развернутой длины пути, количества стрелочных переводов и поправочных коэффициентов, грузонапряженности, установленных скоростей движения подвижного состава, которые определяют затраты труда для конкретной конструкции и условий эксплуатации. Расчеты производятся в системе ЕК АСУТР на основе паспорта дистанции пути, который автоматически загружается из системы оценки и прогнозирования состояния объектов инфраструктуры ЕК АСУИ [7].

Эффективное планирование работ по текущему содержанию пути во многом зависит от рассчитанных значений плановых объемов работ, списочной и явочной численности, квалификации монтеров пути, которые будут выполнять путевые работы в соответствии с требованиями типовых норм времени или карт технологических процессов, а также с учетом численности сигналистов или монтеров пути, имеющих право на ограждение места работы [8, 9].

Средний разряд по нормированным работам характеризует средний уровень сложности технологического процесса и квалификации работников, позволяет установить степень их взаимного соответствия [7, 10]. Расчет среднего разряда работ производится исходя из нормативной трудоемкости работ, через средневзвешенный тарифный коэффициент K_{cp} по формуле:

$$K_{cp} = \frac{\sum K_{p_i} \cdot N_i \cdot V_i}{\sum N_i \cdot V_i},$$

где K_{p_i} – тарифный коэффициент разряда i -ой работы по первому уровню оплаты труда (вне зависимости от того, какой уровень оплаты труда применяется при оплате данной работы); N_i – норма времени i -ой работы; V_i – объем i -ой работы за определенный период времени.

В качестве исходных данных принимается плановый объем путевых работ, а также фактически выполненные объемы работ за предыдущий период времени, аналогичный выбранному. Данные по выполненным объемам работ получают из нормированных заданий, рабочих заданий, подтверждающих фактически выполненные объемы работ [7, 8].

В соответствии с рассчитанным средневзвешенным тарифным коэффициентом находятся близлежащие тарифные коэффициенты по тарифной сетке для первого уровня оплаты труда и рассчитывается средний разряд работ по формуле:

$$R_{cp} = R_M + (K_{cp} - K_M) / (K_B - K_M),$$

где R_M – меньший разряд в соответствии с меньшим тарифным коэффициентом; K_B , K_M – больший и меньший тарифные коэффициенты.

В целях рациональной организации работы и планирования численности рабочих по квалификационному составу, для достижения необходимого уровня качества процессов и услуг средний разряд работ должен соответствовать или быть незначительно выше среднего разряда рабочих [10]. Средний разряд рабочих также рассчитывается в зависимости от средневзвешенного тарифного коэффициента по формуле:

$$K_{cp} = \frac{\sum K_{p_i} \cdot t_i}{\sum t_i},$$

где t_i – фактически отработанное время за выбранный период для i -го разряда.

В соответствии с нормативами оптимальным уровнем организации труда считается тот, когда средний разряд работ выше среднего разряда рабочих не более, чем на 0,5 разряда. Такое соотношение создает перспективы роста квалификации работников. При большем отставании среднего разряда рабочих от среднего разряда работ возможно ухудшение качества выполняемой работы, увеличение затрат, снижение производительности труда монтеров пути, дополнительные финансовые затраты [10, 11].

При значительном повышении среднего разряда рабочих над средним разрядом работ происходит перерасход средств фонда заработной платы, предусмотренных для оплаты фактически выполняемых работ. Кроме того, в данном случае потенциал работников используется нерационально, производительность труда как высококвалифицированных монтеров пути, так и рабочих с низким разрядом снижается. Но и значительное снижение среднего разряда работников по сравнению со средним разрядом работ может указать на отсутствие работников с высоким разрядом при выполнении технологических процессов. Такие случаи происходят часто, так как на время отсутствия

бригадира или дорожного мастера монтеров пути с 5 и 6 разрядами временно переводят на должности руководителей среднего звена. При этом в системе ЕК АСУИ участие таких высококвалифицированных работников в путевых работах не отражается [4].

Разряд рабочих отражается в двух системах – ЕК АСУИ и ЕК АСУТР, а разряд работ только в первой из них.

Материалы и методы исследования

Для исследования применялись статистические и математические методы. Анализ проводился на основе данных, полученных из систем ЕК АСУИ и ЕК АСУТР за 2023 г. по станциям пути ВС ДИ.

В системе ЕК АСУТР в функциональности экономиста сформированы месячные отчеты по штатной численности монтеров пути, но средний разряд монтеров пути инженеру по организации и нормированию труда приходится рассчитывать вручную, так как в системе не заложен алгоритм расчета среднего разряда работников (рис. 4).

В системе ЕК АСУИ формируются несколько отчетов, в которых отражаются разные виды численности монтеров пути – списочная, явочная, среднесписочная. Для анализа выбран отчет по среднему разряду работ и среднему разряду работников (монтеров пути) (рис. 5).

Сравнительный анализ среднего разряда монтеров пути в системах ЕК АСУТР и

ОТЧЕТ О ШТАТНОЙ ЧИСЛЕННОСТИ НА 28.02.2023			Средний разряд монтеров пути	
Наименование структурного подразделения	Наименование должности / профессии	Кол-во шт.ед.		
ПЧ-7 Иркутск-Сортировочный	Всего:	268,00	4,1	
	Монтер пути	268,00		
		РВУ2 06		37,00
		РВУ2 05		47,00
		РВУ2 04		103,00
ПЧ-4 Зима	Всего:	209,00	3,9	
	Монтер пути	209,00		
		РВУ2 06		3,00
		РВУ2 05		39,00
		РВУ2 04		99,00
ПЧ-5 Черемково	Всего:	228,00	3,9	
	Монтер пути	228,00		
		РВУ2 06		9,00
		РВУ2 05		29,00
		РВУ2 04		110,00
ПЧ-9 Слюдянка	Всего:	307,00	4,2	
	Монтер пути	307,00		
		РВУ2 06		28,00

Рис. 4. Отчет о штатной численности из Единой корпоративной автоматизированной системы управления трудовыми ресурсами за январь 2023 г.

Fig. 4. Staffing report from the Unified corporate automated human resource management system for January 2023

Анализ среднего разряда выполняемых работ, среднего разряда рабочих по Восточно-Сибирской ДИ на период с 01.01.2023 по 31.01.2023																																				
Бригада	Средний разряд выполняемых работ/фактический разряд рабочих																																			
	раб.от			фак.т			±			ТОНВ			Работы по балласту			Работы по шпалам			Работы по скреплениям			Работы по стрелочным переводам			Погрузочно-разгрузочные и			Работы по путевым знакам,			Работы по исправлению пути на пучках			Работы по ТС со скреплениями АРС, ЖБР,		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31						
ПЧ-17 Вихоревская	3,27	3,34	0,07	3,16	3,38	0,22	3,47	3,33	-0,14	3,30	3,10	-0,20	3,26	3,36	0,10	5,34	3,36	-1,98	2,62	3,54	0,92	2,00	3,13	1,13	3,19	3,15	-0,04	4,00	3,43	-0,57						
ПЧ-19 Коршунская	2,95	3,28	0,33	2,76	3,20	0,44	3,69	3,46	-0,23	0,00	0,00	0,00	3,26	3,40	0,14	4,84	3,42	-1,42	2,25	3,81	1,56	2,00	3,44	1,44	2,81	3,32	0,51	0,00	0,00	0,00						
ПЧ-21 Ленская	2,94	3,19	0,25	2,70	3,14	0,44	4,18	3,29	-0,89	0,00	0,00	0,00	3,39	3,23	-0,16	4,49	3,24	-1,25	2,23	3,25	1,02	0,00	0,00	0,00	2,95	3,26	0,31	4,40	3,25	-1,15						
ПЧ-01 Тайшетская	3,59	3,56	-0,03	3,31	3,47	0,16	4,15	3,67	-0,48	2,90	3,64	0,74	3,51	3,64	0,13	4,70	3,65	-1,05	3,00	3,02	0,02	2,00	3,53	1,53	2,61	3,56	0,95	4,00	3,00	-1,00						
ПЧ-07 Иркутск-сортировочная	3,81	3,86	0,05	3,80	3,84	0,04	4,25	3,97	-0,28	2,50	4,07	1,57	3,61	3,89	0,28	5,22	3,89	-1,33	3,52	3,95	0,43	2,00	3,96	1,96	2,76	3,82	1,06	4,00	3,93	-0,07						
ПЧ-03 Тулунская	3,52	3,41	-0,11	3,10	3,40	0,30	4,33	3,32	-1,01	3,63	3,41	-0,22	3,87	3,49	-0,38	4,35	3,42	-0,93	2,99	3,09	0,10	2,00	3,55	1,55	3,35	3,41	0,06	4,39	3,28	-1,11						

Рис. 5. Анализ среднего разряда выполняемых работ, среднего разряда рабочих в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой за январь 2023 г.

Fig. 5. Analysis of the average grade of work performed, the average grade of workers in unified corporate automated infrastructure management system for January 2023

ЕК АСУИ показал, что существует несколько причин расхождения среднего разряда монтеров пути:

1. Передача данных из ЕК АСУТР в ЕК АСУИ осуществляется один раз в сутки, что приводит к «запаздыванию» информации о временных переводах монтеров пути на другие должности.

2. В ЕК АСУТР не учитываются временные переводы, отсутствие работников по разным причинам (административные, учебные и очередные отпуска, болезни, неявки по разным причинам), что завышает средний разряд монтеров пути, которые должны участвовать в технологических процессах.

3. В ЕК АСУИ в анализ среднего разряда выполняемых работ включаются и монтеры пути, которые фактически выполняют обязанности сигнальщиков при отсутствии в штате последних, при этом в технологическом процессе такие монтеры пути не принимают участие. На рис. 6 показан анализ различий между

средним разрядом работ и средним разрядом по видам работ.

Анализ по среднему разряду монтеров пути в системах ЕК АСУТР и ЕК АСУИ показал значительные различия в разрядах работников, что говорит о том, что при интеграции данных из основной системы по учету движения контингента монтеров пути «теряется» часть информации о фактическом разряде монтеров пути. Данное обстоятельство значительно влияет и на планирование путевых работ, так как недостаточность информации о среднем разряде монтеров пути снижает вероятность качественного производства технологических процессов, может привести к задержке «технологических» окон для выполнения путевых работ, что негативно может сказаться на скорости движения подвижного состава (рис. 7).

На основании анализа можно сказать, что различие в информации о среднем разряде монтеров пути в разных автоматизированных системах управления приводит к повышению

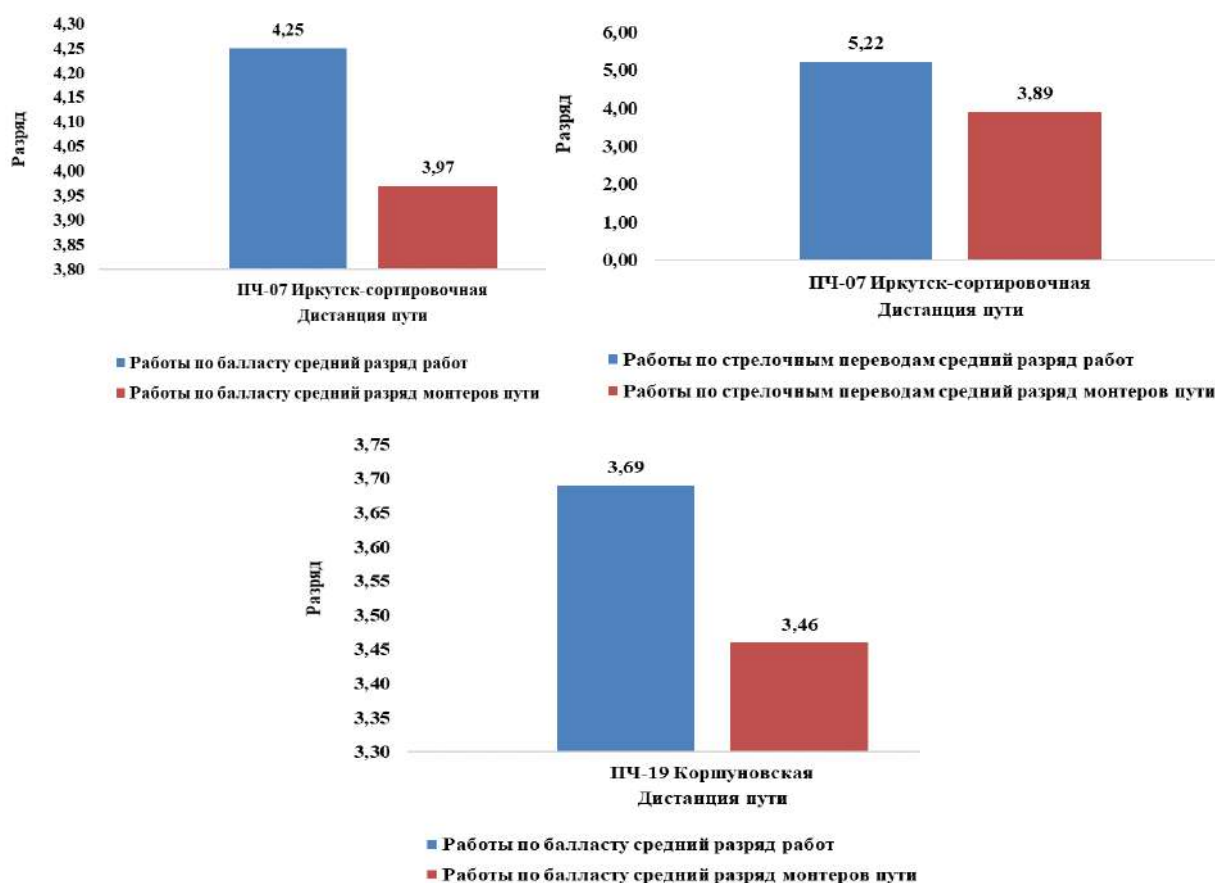
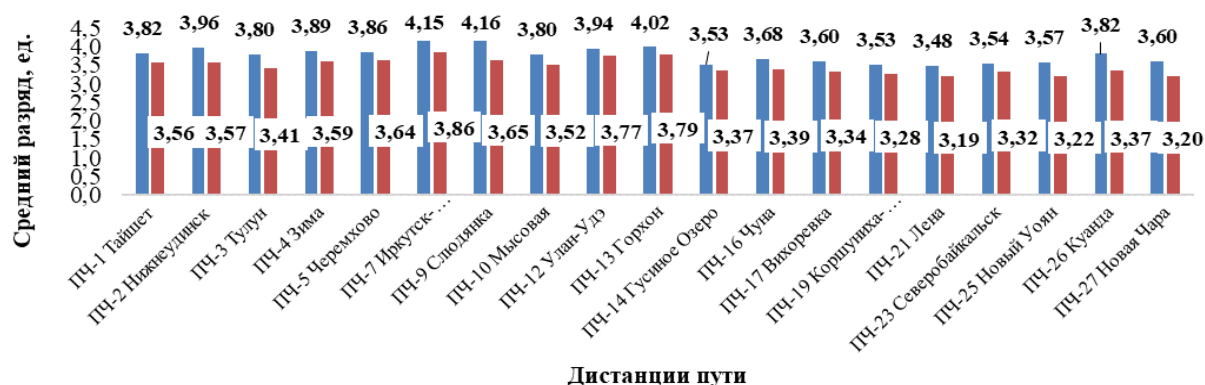


Рис. 6. Анализ среднего разряда работ и среднего разряда работников по некоторым дистанциям пути Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры

Fig. 6. Analysis of the average grade of work and the average grade of workers for some track distances of the East Siberian Infrastructure Directorate



■ Средний разряд монтеров пути ЕК АСУП ■ Средний разряд монтеров пути ЕК АСУИ

Рис. 7. Анализ среднего разряда монтеров пути в системах управления инфраструктурой и трудовыми ресурсами за 2023 г.

Fig. 7. Analysis of the average grade of track fitters in the infrastructure and human resource management systems for 2023

трудозатрат специалистов дистанций пути на ручной анализ фактической численности монтеров пути, которые могли бы выполнять как запланированные, так и внеочередные работы по текущему содержанию пути. Также затруднено планирование путевых работ на годовой период из-за отсутствия в системах прогнозной аналитики, расчета текучести кадров, полной классификации причин снижения численности монтеров пути, мотивации данной категории работников и т.п.

Предложения по результатам исследования

В настоящее время предиктивной аналитике больше уделяется внимания с точки зрения объектов инфраструктуры, их технического состояния и внедрения данной цифровой технологии в информационные системы управления [12–14]. Но назрела необходимость внедрения предиктивной аналитики, машинного обучения, построения нейросетей и в системах, в которых производят планирование и организацию работ по текущему содержанию пути на основании прогнозов о движении основного контингента работников, на которых держится не только путевое хозяйство, но и весь перевозочный процесс – это монтеры пути.

Как уже говорилось, предиктивная аналитика – это анализ данных об объектах на основе математических моделей, который позволяет моделировать будущее поведение объектов с целью принятия решения, помогает выявить потенциальные риски в части планирова-

ния движения контингента в будущем. Прогнозная аналитика позволит провести качественные изменения в холдинге, программах и методах мотивации, обучении и развитии монтеров пути [15–17].

По результатам исследований и по аналогии с моделями предиктивной аналитики объектов инфраструктуры в корпоративных автоматизированных системах управления предлагается блок-схема внедрения данной цифровой технологии для планирования контингента монтеров пути, при этом необходимо включение математических моделей и методов классификации, кластерного анализа и прогноза движения контингента (рис. 8).

Предиктивная аналитика для планирования контингента монтеров пути должна соответствовать требованиям:

- подключение к базовому набору данных – объемы выполненных путевых работ, численность монтеров пути, перемещения рабочих, разряды работ и работников, обучение и т.п.;
- автоматизированная и автоматическая очистка, преобразование, комбинирование данных и моделирование;
- устранение выбросов и пропусков в данных с помощью методов статистической обработки и анализа данных;
- построение моделей машинного обучения для различных наборов показателей, в том числе расчета коэффициента текучести кадров при различных условиях в классификаторе причин увольнения;
- применение различных методов и ал-

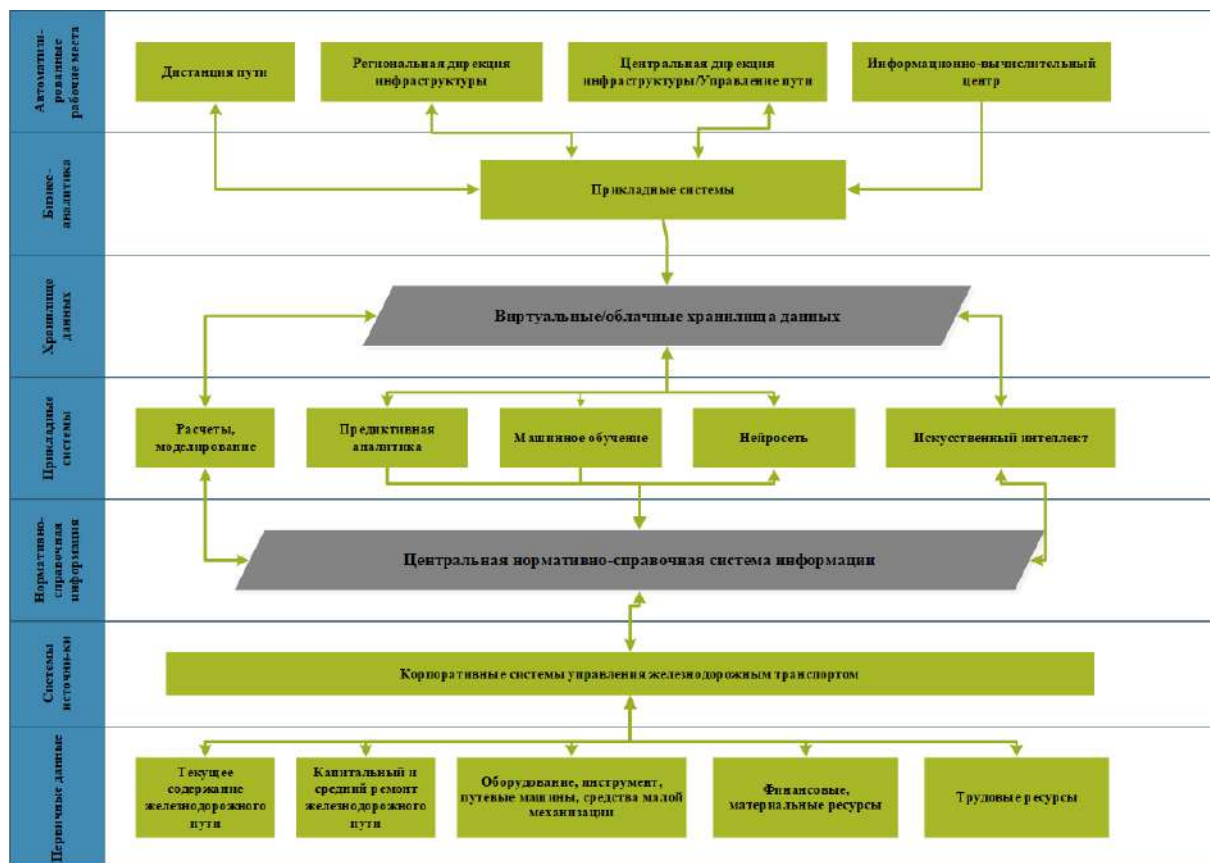


Рис. 8. Блок-схема предиктивной аналитики для автоматизированных систем управления персоналом

Fig. 8. Predictive analytics flowchart for automated personnel management systems

горитмов кластерного анализа данных о контингенте, методов мотивации монтеров пути;

– применение метрик проверки качества разработанных алгоритмов при планировании работ по текущему содержанию пути с соответствием среднего разряда работ среднему разряду работников;

– построение прогнозных моделей и моделей поддержки принятия решений по разработанным моделям машинного обучения, включая: создание прогнозных моделей объемов работ, текучести кадров, численности, разрядности рабочих; создание алгоритмов интерпретации полученных результатов для построения выводов; разработку методов автоматического формирования списков рекомендаций в рамках движения контингента и повышения качества путевых работ [18].

Заключение

Таким образом, внедрение в корпоративные автоматизированные системы управления цифровых технологий – предиктивной аналитики, машинного обучения, искусственного интеллекта, облачного хранения – позволит улучшить состояние по принятию управленческих решений по контингенту дистанций пути, повысит качество выполнения технологических процессов, позволит разработать новые методы мотивации работников, в том числе по повышению квалификации основных рабочих, более эффективно планировать и организовывать работы по текущему содержанию пути, особенно в условиях высокой грузонапряженности, увеличения скорости движения подвижного состава, сокращения межинтервальных перерывов между поездами.

Список литературы

1. Послание Президента РФ Федеральному Собранию от 29.02.2024 б/н. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
2. Об утверждении правил назначения ремонтов железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» № 2888/р от 17.12.2021 (ред. 14.12.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.

3. Об утверждении положения об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений : распоряжение ОАО «РЖД» от 29.11.2019 № 2675/р (ред. 13.12.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
4. Коваленко Н.И., Аноховская И.В., Суворова Д.Р. Планирование работ путевого хозяйства ОАО «РЖД» с использованием системы ЕК АСУИ // Научный журнал. 2020. № 1 (46). С. 5–9.
5. Ремонт не мешает пропуску // Гудок : сайт. URL : <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1657053> (Дата обращения 21.05.2024).
6. Криворотов А.А., Григорьева Н.Н. Инфраструктура Восточного полигона: реальность и перспективы // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2022. Т. 1. С. 330–334.
7. Об утверждении нормативов численности работников, занятых на ремонте железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 18.04.2022 г. № 1055/р. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
8. Севостьянов А.А. Планирование и организация работ по содержанию геометрии рельсовой колеи в зимний период эксплуатации // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 4 (7). С. 95–102.
9. Об утверждении и введении в действие инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 14.11.2016 № 2288р (ред. 13.12.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
10. Об утверждении методики анализа и учета непроизводительных и сверхнормативных затрат рабочего (и связанного с работой) времени работников ведущих профессий (должностей) и основных производственных групп функциональных филиалов ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» от 29.12.2021 № 3053/р. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
11. Дорогань И.А. Влияние организационно-технологической сложности на сроки выполнения работ // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 10. С. 1331–1340.
12. 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.
13. Бурнаев Е.В. Алгоритмические основы предиктивной аналитики в задачах индустриального проектирования // Информационные процессы. 2019. Т. 19. № 3. С. 271–283.
14. Тимофеев Е.Н., Севостьянов А.А. Перспективы цифровой трансформации путевого хозяйства // Наука и молодежь XXI века : материалы регионального форума. Новосибирск, 2022. Ч. 1. С. 143–147.
15. 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.
16. Беннетт Р. Коэффициенты расчета текучести кадров // KPILIB : сайт. URL : <https://www.kpilib.ru/article.php?page=410> (Дата обращения 22.05.2024).
17. Волкова Т.П. Текучесть кадров как проблема кадрового риска в ОАО «РЖД» // Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2023. Вып. 7 (255). С. 259–262.
18. Чуланова О.Л. Возможности применения дескриптивной, прогнозной, предиктивной и прескриптивной HR-аналитики как цифровых трендов // Материалы Афанасьевских чтений. 2020. № 1 (30). С. 40–49.

References

1. Poslanie Prezidenta Rossijski Federatsii Federal'nomu sobraniyu ot 29.02.2024 [Message of the President of the Russian Federation to the Federal Assembly dated February 29, 2024].
2. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» № 2888/r ot 17.12.2021 «Ob utverzhenii pravil naznacheniya remontov zheleznodorozhnogo puti» (red. 14.12.2023) [Order of JSC «Russian Railways» no. 2888/r dated December 17, 2021 «On approval of the rules for the appointment of railway track repairs» (ed. December 14, 2023)].
3. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» ot 29.11.2019 № 2675/r «Ob utverzhenii polozheniya ob organizatsii kompleksnogo ob-sluzhivaniya ob'ektov infrastruktury khozyaistva puti i sooruzhenii» (red. 13.12.2023) [Order of JSC «Russian Railways» dated November 29, 2019 no. 2675/r «On approval of the regulations on the organization of comprehensive maintenance of infrastructure facilities of the track and structures» (ed. December 13, 2023)].
4. Kovalenko N.I., Anokhovskaya I.V., Suvorova D.R. Planirovanie rabot putevogo khozyaistva ОАО «RZhD» s ispol'zovaniem sistemy EK ASUI [Planning of track facilities of JSC «Russian Railways» using the unified corporate automated infrastructure management system]. *Nauchnyi zhurnal* [Scientific Journal], 2020, no. 1 (46), pp. 5–9.
5. Remont ne meshaet propusku (elektronnyi resurs) [Repairs do not interfere with access (electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1657053> (Accessed May 21, 2024).
6. Krivorotov A.A., Grigor'eva N.N. Infrastruktura Vostochnogo poligona: real'nost' i perspektivy [Infrastructure of the Eastern polygon: reality and prospects]. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific region countries in the XXI century], 2022, vol. 1, pp. 330–334.
7. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» ot 18.04.2022 g. № 1055/r «Ob utverzhenii normativov chislennosti rabotnikov, zanyatykh na remonte zheleznodorozhnogo puti» [Order of JSC «Russian Railways» no. 1055/r dated April 18, 2022 «On approval of the standards for the number of employees employed in the repair of railway tracks»].
8. Sevost'yanov A.A. Planirovanie i organizatsiya rabot po soderzhaniiu geometrii rel'sovoi kolei v zimnii period ekspluatatsii [Planning and organization of works on maintenance of rail track geometry in winter period of operation]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy transporta* [Fundamental and Applied Problems of Transport], 2022, no. 4 (7), pp. 95–102.
9. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» ot 14.11.2016 g. № 2288r (red. 13.12.2023) «Ob utverzhenii i vvedenii v deistvie instruksii po tekushchemu soderzhaniiu zheleznodorozhnogo puti» [Order of JSC «Russian Railways» dated November 14, 2016 No 2288r «On the approval and implementation of the instructions for the current maintenance of the railway track» (ed.

December 13, 2023)].

10. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 29.12.2021 № 3053/r «Ob utverzhdenii metodiki analiza i ucheta neproizvoditel'nykh i sverkhnormativnykh zatrat rabocheho (i svyazannogo s rabotoi) vremeni rabotnikov vedushchikh professii (dolzhnostei) i osnovnykh proizvodstvennykh grupp funktsional'nykh filialov OAO «RZhD» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 29, 2021 no. 3053/r «On approval of the methodology for analyzing and accounting for unproductive and excess costs of working (and work-related) time of employees of leading professions (positions) and Main production groups of functional branches of JSC «Russian Railways»].

11. Dorogan' I.A. [The impact of organizational and technological complexity on the timing of work]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering], 2019, vol. 14, no. 10, pp. 1331–1340.

12. 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.

13. 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.

14. Timofeev E.N., Sevost'yanov A.A. Perspektivy tsifrovoi 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.

15. 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 putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2022, no. 12, pp. 2–7.

16. Bennett R. Koeffitsienty rascheta tekuchesti kadrov (elektronnyi resurs) [Coefficients for calculating staff turnover (electronic resource)]. Available at: <https://www.kpilib.ru/article.php?page=410> (Accessed May 22, 2024).

17. Volkova T.P. Tekuchest' kadrov kak problema kadrovogo riska v OAO «RZhD» [Staff turnover as a problem of personnel risk in JSC «Russian Railways»]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport: logistika, stroitel'stvo, ekspluatatsiya, upravlenie»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Transport: logistics, construction, operation, management»]. Ekaterinburg, 2023, iss. 7 (255), pp. 259–262.

18. Chulanova O.L. Vozможности primeneniya deskriptivnoi, prognoznoi, prediktivnoi i preskriptivnoi HR-analitiki kak tsifrovyykh trendov [The possibilities of using descriptive, predictive, predictive and prescriptive HR analytics as digital trends]. *Materialy Afanas'evskikh chtenii* [Materials of Afanas'ev readings], 2020, no. 1 (30), pp. 40–49.

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.

Совершенствование системы оценки стабильности участка пути на перегоне для перспективного планирования выправочных работ

В.О. Певзнер, Р.А. Баронайте✉

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), г. Москва, Российская Федерация

✉baronayte.renata@vniizht.ru

Резюме

Актуальные требования организации технического обслуживания пути характеризуются двумя противоречащими друг другу тенденциями: с одной стороны, рост грузооборота с использованием поездов повышенной массы и вагонов с повышенной осевой нагрузкой ведет к накоплению расстройств пути и увеличению потребности в проведении работ, с другой – рост плотности поездопотока ограничивает время на производство профилактических и ремонтных работ. Существующая система планирования выправочных работ основана на оценке состояния пути по результатам проходов вагонов-путеизмерителей и включает жестко дифференцированные по классам пути сроки назначения работ. Такая система является статичной и не позволяет определить устойчивость характеристик состояния пути во времени или при наработке тоннажа. В современных условиях, когда потребность в работах на ряде участков превышает имеющиеся возможности в предоставлении дополнительных «окон» в графике движения поездов, система планирования выправочных работ должна основываться не на одномоментных характеристиках состояния пути, а на анализе темпа его деградации при наработке тоннажа до выхода на предельный уровень, требующий ограничения скоростей движения поездов. Таким образом, очередность назначения работ должна зависеть от темпов ухудшения состояния пути на конкретных участках. Это требует разработки специальной системы оценки стабильности геометрии рельсовой колеи с установлением порядка очередности производства работ на участках пути, различной протяженности. В качестве решения поставленной задачи в статье предлагается способ двухкомпонентной оценки стабильности геометрии рельсовой колеи, основанный на положении о том, что путь как система является протяженной по длине и изменяющейся в процессе эксплуатации. Представленная система статистических оценок стабильности геометрии рельсовой колеи позволит выделить места, требующие первоочередного проведения работ в условиях высокой плотности поездопотока при ограниченных ресурсах.

Ключевые слова

техническое обслуживание пути, геометрия рельсовой колеи, стабильность участка пути, поездопоток, выправка пути, планирование работ

Для цитирования

Певзнер В.О. Совершенствование системы оценки стабильности участка пути на перегоне для перспективного планирования выправочных работ / В.О. Певзнер, Р.А. Баронайте // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 31–40. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).31-40.

Информация о статье

поступила в редакцию: 12.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 13.09.2024 г.; принята к публикации: 16.09.2024 г.

Improvement of the system for assessing the stability of the railway track section for prospective planning of straightening works

V.O. Pevzner, R.A. Baronaite✉

Scientific and Research Institute of Railway Transport (VNIIZhT), Moscow, the Russian Federation

✉baronayte.renata@vniizht.ru

Abstract

Modern requirements for the organization of track maintenance are characterized by two contradictory trends: on the one hand, an increase in freight turnover using high-weight trains and wagons with increased axial load leads to an accumulation of track disorders and an increase in the need for the works; on the other hand, an increase in train traffic density limits the time for preventive and repair work. The existing system of planning straightening works is based on an assessment of the condition of the track based on the results of the passage of track measuring wagons and includes rigidly differentiated terms of work assignment by track classes. Such a system is static and does not allow us to assess the stability of the characteristics of the state of the track in time or during tonnage operation. In modern conditions, when the need for work on a number of sections exceeds the available possibilities in providing additional «windows» in the train schedule, the system of planning the straightening works should be based not on one-time characteristics of the track condition, but on an analysis of the rate of the track degradation during tonnage running up to the maximum level requiring speed limits for train movements. Thus, the order of work assignment should be determined by the rate of deterioration of the track condition in specific sections. This requires the development of a special system for assessing the stability of the track gauge geometry with es-

establishing of the priority order for work on track sections of various lengths. As a solution to this problem, the article proposes a method for a two-component assessment of the stability of the rail track geometry based on the position that the track, as a system, is extensional in length and varying in the course of operation. The proposed system of statistical estimates of the stability of the rail track geometry will allow to identify places that require priority work under conditions of high density of train traffic with limited resources.

Keywords

track maintenance, track geometry, track section stability, train flow, track alignment, work planning

For citation

Pevzner V.O., Baronaite R.A. Sovershenstvovanie sistemy otsenki stabil'nosti uchastka puti na peregone dlya perspektivnogo planirovaniya vypravochnykh работ [Improvement of the system for assessing the railway track section stability for prospective planning of straightening works]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 31–40. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).31-40.

Article Info

Received: April 12, 2024; Revised: September 13, 2024; Accepted: September 16, 2024.

Введение

Современные условия работы пути характеризуются, с одной стороны, беспрецедентным ростом объемов перевозок, с другой – интенсификацией процессов накопления расстройств по геометрии рельсовой колеи при практически полном исчерпании резервов графика движения поездов для проведения предупредительных работ по техническому обслуживанию пути [1–5].

В таких условиях особую актуальность приобретает вопрос разработки специальной системы организации и планирования работ по устранению возникающих расстройств пути (выправочные работы), основанной не только на одномоментной оценке показателей, характеризующих состояние пути, но и на анализе тенденций изменения этих показателей в различных условиях эксплуатации и прогнозе изменения этих тенденций [6, 7].

Особого внимания требует вопрос рационального распределения имеющихся ресурсов на производство работ по оздоровлению участков пути на широких фронтах в условиях высокой плотности поездопотока (в настоящее время интервалы между поездами, особенно на Восточном полигоне, составляют до 6–8 мин.).

Основываясь на опыте эксплуатационных наблюдений и предыдущих исследований, можно констатировать, что в современных условиях система технического обслуживания пути должна включать несколько уровней решаемых задач:

– порядок определения потребности в работах оперативного характера на коротких фронтах;

– порядок определения потребности в работах на среднесрочный период по прогно-

зу изменения состояния пути для существующих и возможных перспективных условий эксплуатации на фронтах средней и большой протяженности;

– порядок определения потребности в работах по оздоровлению целого перегона с различным состоянием пути на широком фронте.

В основу этих подходов может быть положен порядок статистической обработки информации о состоянии пути, позволяющий устанавливать количественные характеристики геометрии рельсовой колеи в различных условиях эксплуатации на участке заданной длины за устойчивый период времени. Также необходима разработка новых подходов к оценке качества содержания пути.

Э.Я. Шац в 1981 г. отмечал, что в условиях ограниченности ресурсов и возможностей задача состоит не только в том, чтобы правильно найти участки пути, где требуется произвести ремонт, но и в том, чтобы определить по каждому такому участку степень его потребности в ремонте и на основе этого произвести оптимальное распределение имеющихся ресурсов [8].

В.В. Мишин предложил дифференцированную систему технического обслуживания пути, основанную на выделении однородных по техническим характеристикам (план, профиль), условиям эксплуатации, конструкции пути и воздействию подвижного состава, участков пути для оценки стабильности состояния пути и планирования путевых работ. Он отмечал, что длина минимально выделяемых отрезков пути обусловлена технико-экономической целесообразностью проведения на них определенного вида ремонта и составляет:

– для капитальных ремонтов – перегон, часть перегона длиной 5–15 км;

- для средних ремонтов – 500–1 000 м;
- для выправки – 100–300 м [9].

Применение такого дифференцированного подхода позволяет целенаправленно рассматривать ограниченные ремонтные ресурсы и сосредотачивать их именно на тех участках, где вероятность появления отказа пути существенно выше, и которые наиболее нуждаются в оздоровлении.

В современных условиях, когда потребность в работах на ряде участков превышает имеющиеся возможности в предоставлении дополнительных «окон» в графике движения поездов, система планирования выправочных работ должна основываться не на одномоментных характеристиках состояния пути, а на анализе темпа деградации пути при наработке тоннажа до выхода на предельный уровень, требующий ограничения скоростей движения поездов. Это требует разработки специальной системы оценки стабильности геометрии рельсовой колеи с определением порядка очередности производства работ на участках пути различной протяженности. В качестве решения поставленной задачи в статье предлагается способ двухкомпонентной оценки стабильности геометрии рельсовой колеи, основанный на положении о том, что путь как система является протяженной по длине и изменяющейся в процессе эксплуатации.

Целью исследования является иллюстрация результатов анализа стабильности геометрии рельсовой колеи в различных условиях эксплуатации применительно к системе технического обслуживания пути.

Основные положения способа двухкомпонентной оценки стабильности участка пути

Стандартные методы оценки стабильности пути, в том числе согласно действующей нормативной документации [10, 11], в настоящее время включают определение таких характеристик, как среднее значение исследуемой выборки M и среднеквадратическое отклонение (СКО) выборки σ [12, 13].

Применительно к оценке геометрии рельсовой колеи в настоящей статье стандартные методы оценки стабильности предлагается дополнить двухкомпонентной оценкой стабильности одновременно по длине и во времени [14].

Стабильность – это способность системы функционировать, не изменяя собственную структуру, и находиться в равновесии. Это определение должно быть неизменным во времени.

Численная оценка показателя стабильности – это минимальный разброс статистических характеристик геометрии рельсовой колеи участка пути по его длине и за рассматриваемый период времени.

В работе З.Л. Крейниса указывалось, что процесс отклонения очертаний рельсовых нитей на отдельных отрезках пути можно считать стационарным и эргодическим [15].

Основываясь на изложенном, принимаем, что на отрезке пути с постоянными характеристиками в плане и профиле при условно постоянном качестве технического обслуживания пути (участок в пределах одного околотка) процесс накопления расстройств пути является стационарным и эргодическим.

Стационарным случайным процессом в узком смысле называется случайный процесс $X(t)$, все вероятностные характеристики которого не меняются со временем и, следовательно, все n -мерные распределения зависят не от моментов времени t_1, t_2, \dots, t_n , а от длительности временных промежутков τ_i .

Стационарный случайный процесс называется эргодическим, если при определении любых его статистических характеристик усреднение по множеству (ансамблю) реализаций эквивалентно усреднению по времени одной, теоретически бесконечно длинной реализации.

Таким образом, оценка стабильности участка пути с использованием предлагаемого способа позволяет установить, как меняется состояние пути на реализации достаточно большой протяженности в процессе эксплуатации за устойчивый период времени.

Для оценки стабильности участка пути заданной длины (перегона, состоящего из L км) по двухкомпонентному способу определяются:

- показатели стабильности пути по каждому километру в момент времени t ;
- показатели стабильности пути в целом по перегону (участку пути) в момент времени t ;
- показатели стабильности пути по каждому километру за год;
- показатели стабильности пути в целом по перегону (участку пути) за год.

За единицу анализа принимается количество отступлений II степени (планового устранения) по геометрии рельсовой колеи.

На рис. 1 к численным показателям, характеризующим стабильность пути по геометрии рельсовой колеи *на отдельных километрах*, относятся:

– N_L – суммарное количество отступлений по геометрии рельсовой рельсовой колеи на участке пути длиной L ;

– M_L – средняя величина количества отступлений по геометрии рельсовой колеи на участке пути длиной L ;

– σ_L – среднеквадратическое отклонение количества отступлений по геометрии рельсовой рельсовой колеи на участке пути длиной L ;

– C_{VL} – коэффициент вариации, характеризующий плотность распределения отступлений по геометрии рельсовой колеи по длине отрезка пути длиной L , определяемый по формуле (1):

$$C_{VL} = \frac{\sigma_L}{M_L}. \quad (1)$$

Для оценки стабильности геометрии рельсовой колеи *на реализации километров* в процессе эксплуатации (двухкомпонентный способ) определяются следующие показатели.

1. Изменчивость во времени средней величины исследуемого параметра, распределенного по длине участка пути, предлагается оценивать по показателю, характеризующему среднее значение исследуемого параметра в годовой динамике t на участке пути длиной L по формуле (2):

$$M_L^{t(T)} = \frac{\sum_{i=1}^{12} M_L}{12}, \quad (2)$$

где 12 – число месяцев за рассматриваемый период.

2. Количественную характеристику стабильности участка пути предлагается оценивать по величине, характеризующей изменчивость (разброс) значений исследуемого параметра в годовой динамике t на участке пути длиной L по формуле (3):

$$\sigma_{\delta L}^{t(T)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (\sigma_L - \overline{\sigma_L^{t(T)}})^2}{12}}, \quad (3)$$

где $\overline{\sigma_L^{t(T)}}$ – показатель, характеризующий среднее значение изменчивости (средний разброс) значений исследуемого параметра в годовой динамике t на участке пути длиной L , определяемый по формуле (4):

$$\overline{\sigma_L^{t(T)}} = \frac{\sum_{i=1}^{12} \sigma_L}{12}. \quad (4)$$

Два последних показателя характеризуют линейный размах (разброс) системы во времени (в узком или широком диапазоне значений). Другими словами, служат для оценки энтропии (разброса) системы во времени (в процессе эксплуатации).

Оценка степени стабильности участка пути может быть выполнена по характеру наклона прямой роста числа отступлений, как

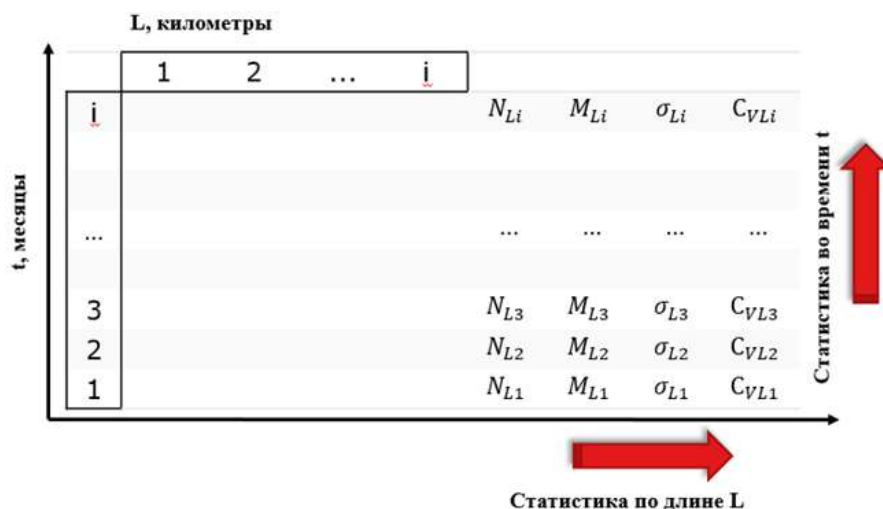


Рис. 1. Общий вид способа двухкомпонентной оценки стабильности участка пути
Fig. 1. A general view of the method for a two-component assessment of the track section stability

это показано в работе А.В. Дворникова [16]. При этом можно рассмотреть два случая.

1. Применение показателя стабильности в качестве дополнительного критерия в системе выбора мест, требующих первоочередного проведения работ, для случая, когда потребности превышают имеющиеся возможности (рис. 2). Как видно на рис. 2, участок 3 менее стабилен, чем участки 2 и 1. Таким образом, на этом участке выправочные работы должны назначаться в первую очередь.

2. Применение показателя стабильности при прогнозировании потребности в работах в зависимости от темпа ухудшения состояния пути на конкретном участке (рис. 3).

Как следует из рис. 3, на участке 1 интенсивность ухудшения состояния пути выше, чем на участке 2. Таким образом, участок 1 является

более приоритетным при планировании работ на среднесрочный период.

Обобщив сказанное можно констатировать, что критерий назначений выправки пути должен быть не одномоментным, а основанным на постоянном мониторинге стабильности состояния пути и анализе тенденций ее изменения при наработке тоннажа.

Обобщенные результаты анализа стабильности на отдельных километрах грузовых ходов

Для выявления закономерностей изменения состояния пути при наработке тоннажа на первом этапе анализ стабильности параметров геометрии рельсовой колеи проводился по отдельным километрам.

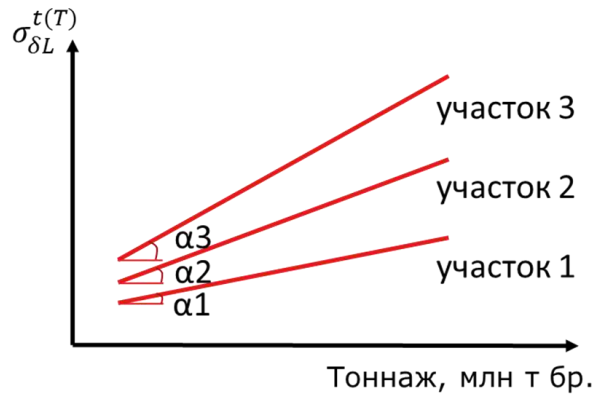


Рис. 2. Применение показателя стабильности в системе выбора мест, требующих первоочередного проведения работ ($\alpha_1 - \alpha_3$ – углы наклона изменения показателя стабильности геометрии рельсовой колеи по двухкомпонентной оценке на трех участках ($\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$))

Fig. 2. Application of the stability indicator in the system of selecting places requiring priority work ($\alpha_1 - \alpha_3$ – are the angles of inclination of the change in the stability indicator of the geometry of the rail track according to a two-component assessment on 3 sections ($\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$))

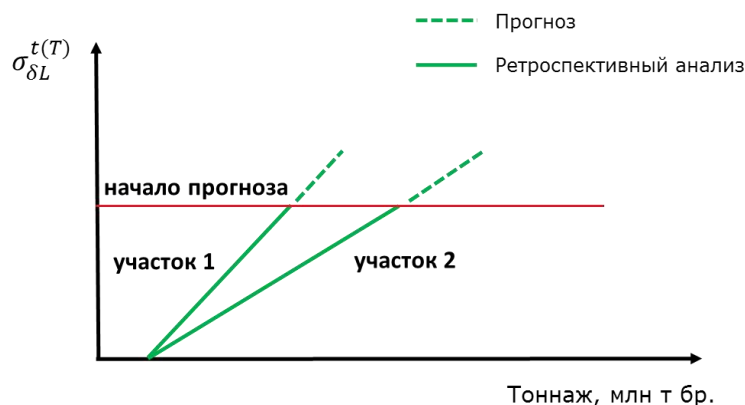


Рис. 3. Применение показателя стабильности при прогнозировании потребности в работах в зависимости от темпа ухудшения состояния пути на конкретном участке

Fig. 3. The use of the stability indicator in predicting the need for work depending on the rate of deterioration of the track in a particular section

Для анализа были подобраны опытные участки трех дорог грузового хода: Горьковской, Южно-Уральской и Северной. Эксплуатационные наблюдения, основанные на статистическом анализе данных проходов путеизмерителей, проводились в течение двухлетнего периода.

На примерах, приведенных на рис. 4 и 5, показано, что процессы накопления отступлений по геометрии рельсовой колеи при наработке тоннажа характеризуются стадиями ста-

билизации, стабильной работы и периодами роста расстройств.

Так, на первом участке (рис. 4), где в основном проводилась локальная выправка пути (на длине 200–300 м), даже при наработке тоннажа менее 450 млн·т брутто после капитального ремонта, периоды стабильной работы пути практически отсутствуют.

На втором участке с наработкой тоннажа более 850 млн·т брутто после капитального ремонта (рис. 5) наблюдается длительный период

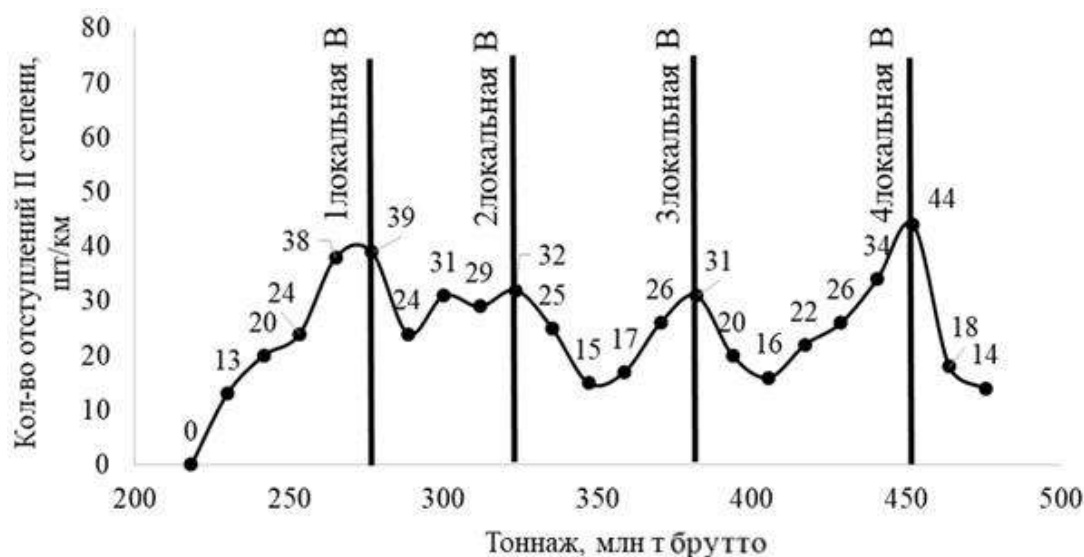


Рис. 4. Динамика изменения количества отступлений II степени по геометрии рельсовой колеи на километре с пропущенным тоннажем после капитального ремонта более 850 млн·т брутто (В – выправка пути)

Fig. 4. Dynamics of changes in the number of grade II deviations in the geometry of the rail track per kilometer with put through tonnage after major repairs up to 450 million tons gross (B – track straightening)

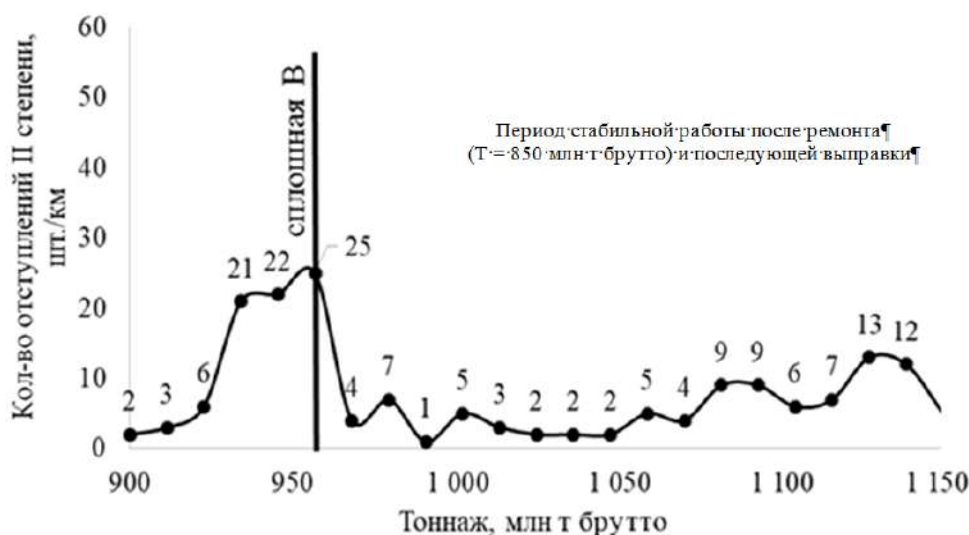


Рис. 5. Динамика изменения количества отступлений II степени по геометрии рельсовой колеи на километре с пропущенным тоннажем после капитального ремонта более 850 млн т брутто (В – выправка пути)

Fig. 5. Dynamics of changes in the number of grade II deviations in the geometry of the rail track per kilometer with put through tonnage after major repairs of more than 850 million tons of brutto (B – track straightening)

стабильной работы пути после промежуточного ремонта (РС), проведенного в соответствии с ремонтной схемой до 1,4 млрд-т брутто (КРН-В-В-РС(РП)-В-П-КРН) [17], и последующей выправки пути.

Результаты проведенного анализа показали, что ремонт третьего уровня (РС) и последующая выправка пути позволили обеспечить длительный стабильный период после ремонта даже при высокой наработке тоннажа.

Обобщенные результаты анализа стабильности геометрии рельсовой колеи на перегонах по двухкомпонентному способу

Анализ стабильности геометрии рельсовой колеи на перегонах проводился по ансамблю данных с участков, сгруппированных по диапазонам пропущенного тоннажа:

– участки с пропущенным тоннажем менее 350 млн-т брутто (принимается как наибольший диапазон стабилизации пути после капитального ремонта);

– участки с пропущенным тоннажем 350–700 млн-т брутто (период стабильной работы пути);

– участки с пропущенным тоннажем 700–850 млн-т брутто (период роста расстройств для случая, когда капиталь-

ный/промежуточный вид ремонта при тоннаже 700 млн-т брутто не проводился);

– участки с пропущенным тоннажем более 850 млн-т брутто. Общий объем статистической выборки составил более 11 тыс. точек за двухлетний период наблюдений.

Результаты анализа по ансамблю сгруппированных данных, взятых с участков (перегонов) с одинаковой схемой организации ремонтов пути при различном нарастающем пропущенном тоннаже, показали, что даже при одинаковых условиях эксплуатации состояние пути на участках может различаться в широких диапазонах значений, что обусловлено различной схемой организации работ по техническому обслуживанию пути и условиями эксплуатации.

Для определения интенсивности прироста приведенных показателей стабильности на различных стадиях жизненного цикла пути были получены зависимости, характеризующие динамику изменения показателей стабильности пути при наработке тоннажа по ансамблю сгруппированных данных и различном нарастающем пропущенном тоннаже.

На примере участков Горьковской дирекции инфраструктуры можно констатировать, что процесс изменения показателей стабильности пути по длине и во времени (при наработке

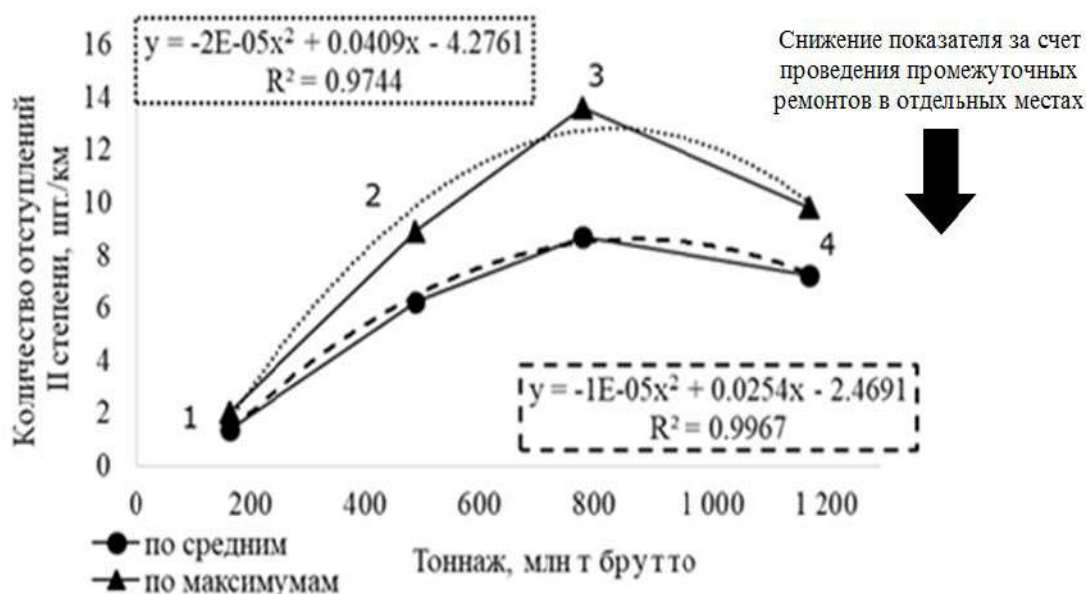


Рис. 6. Зависимости среднегодового количества отступлений II степени (N) при наработке тоннажа, полученные по ансамблю данных с перегонов Горьковской дирекции инфраструктуры (1–4 – стадии жизненного цикла пути)

Fig. 6. Dependencies of the average annual number of grade II deviations (N) during tonnage operating time, obtained from the ensemble of data from the stages of the Gor'kii Directorate of Infrastructure (1–4 – railway life cycle stages)

тоннажа) не является равномерным и в общем виде описывается:

– по показателю $M_L^{(T)}$ – полиномиальными функциями второго порядка возрастающего и убывающего характера (рис. 6);

– по показателям $\sigma_{\delta L}^{(T)}$ и $\overline{\sigma_L^{(T)}}$ – логарифмическими (в отдельных случаях – линейными) функциями возрастающего характера (рис. 7).

Как видно на рис. 6 на участках с большим пропущенным тоннажом в отдельных местах путь более стабилен, чем при меньшем пропущенном тоннаже. Это может быть обусловлено выполнением промежуточных ремонтов пути, предусмотренных ремонтными схемами (до наработки 1 400 млн·т брутто) [17]. Полученные результаты хорошо коррелируются с ранее проведенными исследованиями [16, 18].

Наоборот, максимальные значения показателей изменчивости статистической выборки по СКО (рис. 7) выявлены на участках, пропустивших наибольший тоннаж. Это указывает на то, что несмотря на снижение величины среднегодового количества отступлений по геометрии рельсовой колеи, на этих участках существует опасность возможного резкого ухудшения состояния пути.

Полученные результаты доказывают влияние состояния пути, условий эксплуатации и системы организации технического обслуживания пути на стабильность геометрии рельсовой колеи при наработке тоннажа.

Заключение

По результатам проведенного исследования можно констатировать, что в системе организации технического обслуживания пути для принятия управленческих решений необходимо учитывать, что железнодорожный путь – изменяющаяся (деградирующая и восстанавливаемая за счет проведения работ) система и для оценки закономерностей ее изменения требуется применение нестандартных подходов.

В основу этих подходов может быть положена система статистической обработки информации о состоянии геометрии рельсовой колеи, позволяющая устанавливать количественные характеристики геометрии рельсовой колеи в различных условиях эксплуатации (двухкомпонентная система).

Потребность и очередность проведения работ на участках достаточно большой протяженности на среднесрочную перспективу в современных условиях необходимо оценивать не только по одномоментным характеристикам состоя-

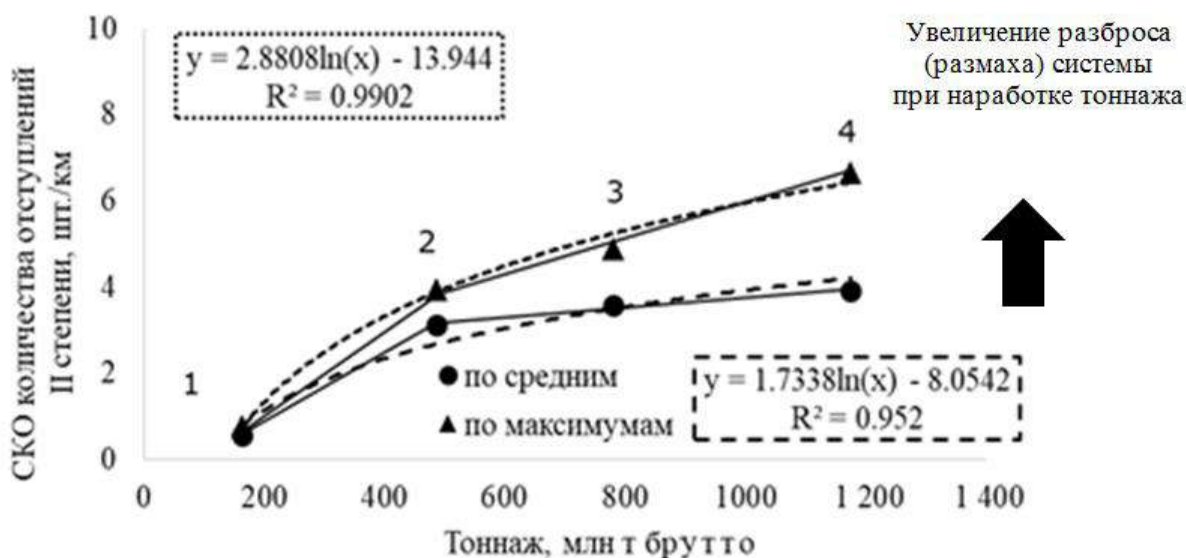


Рис. 7. Зависимости среднеквадратического отклонения количества отступлений II степени (N) при наработке тоннажа, полученные по ансамблю данных с перегонов Горьковской дирекции инфраструктуры (1–4 – стадии жизненного цикла пути)

Fig. 7. Dependencies of the standard deviation of the number of grade II deviations (N) during tonnage operating time, obtained from the ensemble of data from the stages of the Gor'kii Directorate of Infrastructure (1–4 – railway life cycle stages)

ния пути, но и по тенденциям его изменения в процессе эксплуатации. Для этого предлагается способ двухкомпонентной оценки стабильности участка пути по параметрам, одновременно распределенным по длине и во времени.

Предлагаемый способ позволит своевременно выявлять участки с нестабильным состоянием пути в пределах отрезков (перегонов) большой протяженности для перспективного планирования работ по их оздоровлению.

Список литературы

1. Гапанович В.А. Вопросы взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры при тяжеловесном движении // Железнодорожный транспорт. 2016. № 10. С. 9–15.
2. Воздействие на путь вагонов с повышенной осевой нагрузкой / В.В. Третьяков, В.О. Певзнер, И.Б. Петропавловская и др. // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2016. Т. 75. №. 4. С. 233–238.
3. Певзнер В.О., Гринь Е.Н. Совершенствование системы управления техническим обслуживанием пути // Железнодорожный транспорт. 2021. № 2. С. 54–59.
4. Шапетько К.В. Исследования накопления деформаций железнодорожного пути на участке испытаний вагонов с осевой нагрузкой 27 тс // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2017. Т. 76. № 4. С. 238–242.
5. Щепотин Г.К. Управление техническим состоянием пути в условиях модернизации Восточного полигона // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 3. С. 35–37.
6. Атапин В.В., Нечушкин А.С. Исследование деградационных процессов геометрии рельсовой колеи – путь к прогнозированию состояния верхнего строения пути // Вестник транспорта Поволжья. 2022. № 2 (92). С. 31–37.
7. Бельтюков В.П. Принципы прогнозирования изменения технического состояния железнодорожного пути // Инфраструктура транспорта. 2022. № 1 (3). С. 65–78.
8. Шац Э.Я. Методика оптимального планирования капитального ремонта пути в пределах железной дороги : автореф. дисс. канд. техн. наук. М., 1981. 22 с.
9. Мишин В.В. Прогнозирование состояния пути. Проблемы и решения // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 7. С. 2–6.
10. Об утверждении методики оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности : распоряжение ОАО «РЖД» № 2706р от 22.12.2017. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
11. Об утверждении инструкции по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов : распоряжение ОАО «РЖД» № 436/р от 28.02.2020 г. (ред. 29.06.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
12. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М. : Высш. шк., 1999. 576 с.
13. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.
14. Певзнер В.О. Первые итоги эксплуатационных наблюдений в кривых участках пути с суженной шириной колеи // Тр. Всесоюз. заоч. ин-та инженеров ж.-д. трансп. М., 1969. Вып. 43. С. 15–26.
15. Крейнис З.Л., Зеленая Л.В. Корреляционный анализ очертаний рельсовых нитей на прямых участках железнодорожного пути // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 1975. № 5. С. 40–43.
16. Дворников А.В. Выявление нестабильных участков пути и прогнозирование их состояния : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 24 с.
17. Об утверждении правил назначения ремонтов железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» № 2888/р от 17.12.2021 (ред. 14.12.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
18. Шеронова Т.Н. Совершенствование системы технического обслуживания пути с целью увеличения межремонтного ресурса : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 24 с.

References

1. Gapanovich V.A. Voprosy vzaimodeistviya podvizhnogo sostava i infrastruktury pri tyazhelovesnom dvizhenii [Issues of interaction of rolling stock and infrastructure in heavy traffic]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway Transport], 2016, no. 10, pp. 9–15.
2. Tret'yakov V.V., Pevzner V.O., Petropavlovskaya I.B., Gromova T.I., Tret'yakov I.V., Shapet'ko K.V., Smelyanskaya I.S., Tomilenko A.S. Vozdeystvie na put' vagonov s povyshennoi osevoi nagruzkoj [Impact on the track of wagons with increased axial load]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport], 2016, vol. 75, no. 4, pp. 233–238.
3. Pevzner V.O., Grin' E.N. Sovershenstvovanie sistemy upravleniya tekhnicheskim obsluzhivaniem puti [Improvement of the track maintenance management system]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway Transport], 2021, no. 2, pp. 54–59.
4. Shapet'ko, K.V. Issledovaniya nakopleniya deformatsii zheleznodorozhnogo puti na uchastke ispytaniya vagonov s osevoi nagruzkoj 27 ts [Studies of the accumulation of railway track deformations at the testing site of wagons with an axial load of 27 tc]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport], 2017, vol. 76, no. 4, pp. 238–242.
5. Shchepotin G.K. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem puti v usloviyakh modernizatsii Vostochnogo poligona [Management of the technical condition of the track in the conditions of modernization of the Eastern landfill]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and Track Facilities], 2022, no. 3, pp. 35–37.
6. Atapin V.V., Nechushkin A.S. Issledovanie degradatsionnykh protsessov geometrii rel'sovoi kolei – put' k prognozirovaniyu sostoyaniya verkhnego stroeniya puti [The study of degradation processes of the geometry of the rail track is the way to predict the state of the upper structure of the track]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region], 2022, no. 2 (92), pp. 31–37.

7. Bel'tyukov V.P. Printsipy prognozirovaniya izmeneniya tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezнодорожного пути [Principles of forecasting changes in the technical condition of a railway track]. *Infrastruktura transporta* [Transport infrastructure], 2022, no. 1 (3), pp. 65–78.
8. Shats E.Ya. Metodika optimal'nogo planirovaniya kapital'nogo remonta puti v predelakh zheleznoi dorogi [The methodology of optimal planning of the overhaul of the track within the railway]. Ph.D.'s theses. Moscow, 1981. 22 p.
9. Mishin V.V. Prognozirovanie sostoyaniya puti. Problemy i resheniya [Predicting the state of the track. Problems and solutions]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and Track Facilities], 2011, no. 7, pp. 2–6.
10. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 2706r ot 22.12.2017 «Ob utverzhdenii metodiki otsenki vozdeistviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya nadezhnosti» [Order of JSC «Russian Railways» no. 2706r dated December 22, 2017 «On approval of the methodology for assessing the impact of rolling stock on the track under the conditions of ensuring reliability»].
11. Rasporyazhenie OAO «RZhD» №436/r ot 28.02.2020 g. «Ob utverzhdenii instruktsii po otsenke sostoyaniya rel'sovoi kolei puteizmeritel'nymi sredstvami i meram po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov» (red. 29.06.2023) [Order of JSC «Russian Railways» no. 436/r «On approval of the instructions for assessing the condition of the rail gauge with track measuring devices and measures to ensure the safety of train traffic» (ed. June 29, 2023)].
12. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnosti [Probability theory]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1999. 576 p.
13. Kremer N.Sh. Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: YUNITI-DANA Publ., 2004. 573 p.
14. Pevzner V.O. Pervye itogi ekspluatatsionnykh nablyudenii v krivykh uchastkakh puti s suzhennoi shirinoy kolei [The first results of operational observations in curved sections of track with a narrowed track width]. *Trudy Vsesoyuznogo zaochnogo instituta inzhenerov zhelezнодорожного transporta* [Proceedings of the All-Union Correspondence Institute of Railway Engineers], 1969, iss. 43, pp. 15–26.
15. Kreinis Z.L., Zelenaya L.V. Korrelyatsionnyi analiz ochertanii rel'sovykh nitei na pryamykh uchastkakh zhelezнодорожного пути [Correlation analysis of the outlines of rail threads on straight sections of the railway track]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zhelezнодорожного transporta* [Bulletin of the All-Union Scientific Research Institute of Railway Transport], 1975, no. 5, pp. 40–43.
16. Dvornikov A.V. Vyyavlenie nestabil'nykh uchastkov puti i prognozirovanie ikh sostoyaniya [Identification of unstable sections of the track and forecasting their condition]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2008. 24 p.
17. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 2888/r ot 17.12.2021 «Ob utverzhdenii pravil naznacheniya remontov zhelezнодорожного пути» (red. 14.12.2023) [Order of JSC «Russian Railways» no. 2888/r dated December 17, 2021 «On approval of the rules for the appointment of railway track repairs» (ed. December 14, 2023)].
18. Sheronova T.N. Sovershenstvovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya puti s tsel'yu uvelicheniya mezhremontnogo resursa [Improvement of the track maintenance system in order to increase the repair life]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2008. 24 p.

Информация об авторах

Певзнер Виктор Ошерович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Научного центра «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), г. Москва; e-mail: vpevzner@list.ru.

Баронайте Рената Арвидасовна, ведущий инженер Научного центра «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), г. Москва; e-mail: baronayte.renata@vniizht.ru.

Information about the authors

Viktor O. Pevzner, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Chief Researcher of the Scientific Center «Infrastructure», Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT), Moscow; e-mail: vpevzner@list.ru.

Renata A. Baronaitė, Leading Engineer of the Scientific Center «Infrastructure», Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT), Moscow; e-mail: baronayte.renata@vniizht.ru.

Оценка применения рекуперативного торможения электровозов для повышения энергетической эффективности электрической тяги и безопасности движения поездов

А.А. Бакланов✉, А.П. Шилияков

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

✉aleksbakl@mail.ru

Резюме

Расширение возможностей использования рекуперативного торможения современного электроподвижного состава является актуальной проблемой в контексте увеличения интенсивности движения поездов. В статье представлены результаты исследования применения рекуперативного торможения электровозов для повышения энергетической эффективности и безопасности движения грузовых и пассажирских поездов. В работе использовались следующие методы: математический анализ, методы тяговых расчетов и энергетического баланса. Рассмотрены уравнения энергетического баланса движения поезда и его составляющих в режиме рекуперативного торможения, позволяющие выявить основные факторы, влияющие на возврат электроэнергии. Получены зависимости возврата электроэнергии при рекуперативном торможении, помогающие оценить воздействие отдельных факторов на возврат электроэнергии в процессе рекуперативного торможения электровоза. Авторами даны рекомендации по сокращению энергозатрат при вождении поездов с использованием рекуперативного торможения. Представлены результаты применения данного вида торможения для снижения скорости и повышения безопасности движения поездов. Показано, что рекуперативное торможение позволяет достаточно эффективно снижать скорость движения грузовых груженных и порожних, а также пассажирских вагонов. Однако наиболее целесообразно применять такое торможение на грузовых порожних и пассажирских поездах. Определены условия, которые способствуют увеличению возврата электроэнергии при рекуперативном торможении электровозов и позволяют использовать такое торможение для снижения скорости движения. Применение разработанных предложений повысит энергетическую эффективность электрической тяги и безопасность железнодорожного транспорта.

Ключевые слова

электровоз, рекуперативное торможение, грузовой поезд, пассажирский поезд, возврат электроэнергии, безопасность движения

Для цитирования

Бакланов А.А. Оценка применения рекуперативного торможения электровозов для повышения энергетической эффективности электрической тяги и безопасности движения поездов / А.А. Бакланов, А.П. Шилияков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 41–51. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).41-51.

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 04.09.2024 г.; принята к публикации: 05.09.2024 г.

Evaluation of the use of regenerative braking of electric locomotives to improve the energy efficiency of electric traction and train safety

A.A. Baklanov✉, A.P. Shilyakov

Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

✉aleksbakl@mail.ru

Abstract

Expanding the possibilities of using regenerative braking of modern electric rolling stock is a pressing issue in the context of increasing train traffic intensity. The article presents the results of a study on the use of regenerative braking of electric locomotives to improve energy efficiency and traffic safety of freight and passenger trains. Methods used: mathematical analysis, methods of traction calculations and energy balance. The equations of the energy balance of the movement of a train and its components in the regenerative braking mode are considered, which make it possible to identify the main factors influencing the recovery of electricity. The dependences of the recovery of electricity during regenerative braking are obtained, which make it possible to evaluate the influence of individual factors on the recovery of electricity during regenerative braking of an electric locomotive. Recommendations are given for reducing energy consumption when driving trains using regenerative braking. The results of using regenerative braking of electric locomotives to reduce speed and improve train safety are presented. It has been shown that regenerative braking makes it possible to quite effectively reduce the speed of loaded and empty freight trains, as well as passenger trains. However, it is most advisable to use such braking to reduce the speed of empty freight and passenger trains. The con-

ditions under which it is possible to increase the recovery of electricity during regenerative braking of electric locomotives and use such braking to reduce the speed of movement have been determined. The application of the developed proposals will improve the energy efficiency of electric traction and the safety of train traffic.

Keywords

electric locomotive, regenerative braking, freight train, passenger train, electricity recovery, traffic safety

For citation

Baklanov A.A., Shilyakov A.P. Otsenka primeneniya rekuperativnogo tormozheniya elektrovozov dlya povysheniya energeticheskoi effektivnosti elektricheskoi tyagi i bezopasnosti dvizheniya poyezdov [Evaluation of the use of regenerative braking of electric locomotives to improve the energy efficiency of electric traction and train safety]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 41–51. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).41-51.

Article info

Received: April 15, 2024; Revised: September 4, 2024; Accepted: September 5, 2024.

Введение

Объектом исследования является рекуперативное торможение (РТ) электроподвижного состава (ЭПС), которое получило широкое распространение в электрической тяге поездов на железнодорожном транспорте. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что при прочих равных условиях РТ электровазов является необходимым, а во многих случаях и достаточным условием получения минимального расхода электроэнергии на тягу поездов [1–16]. Поэтому обычно его используют для сокращения расхода энергии на тягу путем преобразования избыточной механической энергии в электрическую с помощью тяговых электродвигателей (ТЭД) и возврата ее в систему тягового электроснабжения для использования другими электровазами, работающими в режиме тяги. Однако иногда РТ также применяют и для снижения скорости движения поезда перед участками с ограничениями скорости и даже для остановок.

Для эффективного применения РТ требуются определенные условия. Это прежде всего наличие потребителей электроэнергии, выработанной рекуперировавшим электровазом, т.е. нахождение в зоне рекуперации других электровазов, движущихся с поездами в тяговом режиме, которые потребляют возвращенную в тяговую сеть электроэнергию, создавая тем самым нагрузку для рекуперировавшего электроваза [7, 8]. При наличии в зоне рекуперации электровазов, работающих в режиме тяги, напряжение в контактной сети, как правило, не превышает допустимого значения [1–4]. Другим обязательным условием безопасного и эффективного применения РТ является реализация тормозной силы рекуперировавшим электровазом без превышения

предела по сцеплению колес с рельсами, т.е. реализация безюзового торможения для предотвращения возникновения так называемых ползунов на поверхностях катания колес электроваза [13, 14]. Указанные условия необходимо учитывать при рассмотрении процесса рекуперативного торможения ЭПС.

Цель работы заключается в оценке энергетической эффективности РТ электроваза при движении поезда с установившейся и неустановившейся скоростью, определении степени влияния различных факторов на возврат электроэнергии, разработке рекомендаций по повышению энергетической эффективности РТ электроваза и безопасности движения поездов.

Расчетные формулы

В соответствии с энергетическим балансом движения поезда возврат электроэнергии электроваза A_3 в режиме РТ характеризуется уравнением:

$$A_3 = A_{эд} + A_{сн} = A_{д} \eta_{эд} + A_{сн} = (A_{к} + A_{п} + A_{сo} + A_{сr}) \cdot \eta_{эд} + A_{сн}, \quad (1)$$

где $A_{эд}$ – электроэнергия, выработанная ТЭД; $A_{сн}$ – электроэнергия, потребленная собственными нуждами электроваза; $A_{д}$ – механическая энергия, преобразуемая ТЭД в электрическую энергию; $\eta_{эд}$ – коэффициент полезного действия (КПД) энергетической цепи ТЭД; $A_{к}$, $A_{п}$ – изменения кинетической и потенциальной энергии поезда; $A_{сo}$ и $A_{сr}$ – затраты энергии на преодоление основного и дополнительного сопротивления движению от кривых.

Из уравнения (1) видно, что количество механической энергии, которое может быть преобразовано в электрическую в процессе торможения, определяется изменениями кине-

тической и потенциальной энергии поезда и затратами энергии на преодоление основного и дополнительного сопротивления движению от кривых, характеризуемых выражениями:

$$A_k = mk_u \cdot \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}; A_{\pi} = mgiL; A_{co} = mgw_oL;$$

$$A_{cr} = mgw_rL,$$

где $m = m_{л} + m_{с} = m_{л} + n_{в} \cdot m_{в}$ – масса поезда; $m_{л}$, $m_{с}$ – масса локомотива и состава; $n_{в}$, $m_{в}$ – число вагонов и масса одного вагона; k_u – коэффициент инерции вращающихся частей поезда [17]; V_1 , V_2 – начальная и конечная скорости на участке рекуперативного торможения; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; i , L – крутизна уклона и длина участка рекуперативного торможения; w_o и w_r – удельные основное и дополнительное сопротивление движению от кривых.

Затраты энергии на собственные нужды электровоза и поезда определяются их мощностью $P_{с.н.}$ и временем движения T в режиме РТ:

$$A_{сн} = P_{сн} \cdot T.$$

Удельный возврат электроэнергии в режиме РТ электровоза ($\text{кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$) определяется выражением:

$$a_3 = \frac{A_3 \cdot 10^4}{m_c L}.$$

Относительным показателем эффективности РТ является коэффициент возврата электроэнергии, который оценивают для одной поездки или для всей совокупности поездок на данном участке в виде отношения полного возврата электроэнергии $A_{\text{зр}}$ в режиме РТ к полному потреблению электроэнергии $A_{\text{зт}}$ в режиме тяги по формуле:

$$k_p = \frac{A_{\text{зр}}}{A_{\text{зт}}}.$$

В режиме РТ обычно поддерживают заданную скорость движения на спуске, но иногда его используют для снижения скорости. В первом случае РТ на спуске реализуется чаще всего при постоянной скорости движения, во втором случае РТ начинается от высокой скорости и продолжается до некоторой минимальной скорости, ограниченной определенными условиями.

Рекуперативное торможение с установившейся скоростью движения на спусках

Рассмотрим особенности возврата электроэнергии при РТ электровоза с грузовым

грузеным и порожним поездами. Состав поезда сформирован из инновационных четырехосных грузовых вагонов, количество вагонов 71, масса груженого состава 7 100 т, порожнего – 1 775 т. Масса электровоза принята равной 200 т, КПД энергетической цепи ТЭД электровоза – 0,8, мощность собственных нужд электровоза – 120 кВт. Остальные исходные данные взяты из [17–19].

На рис. 1 а, б показаны рассчитанные по приведенным ранее формулам кривые удельного возврата электроэнергии в режиме РТ электровоза с грузовыми груженым поездом массой 7 100 т и порожним поездом массой 1 775 т в зависимости от установившейся скорости движения на спусках различной крутизны. Их анализ показывает, что при неизменной скорости движения поезда и увеличении крутизны уклона удельный возврат электроэнергии пропорционально возрастает.

На уклоне неизменной крутизны при уменьшении скорости движения удельный возврат электроэнергии в зоне высоких скоростей возрастает, достигает максимума, а в зоне низких скоростей снижается. Такие изменения связаны с влиянием затрат энергии на собственные нужды электровоза и преодоление основного сопротивления движению поезда. По сравнению с груженым поездом при прочих равных условиях возврат электроэнергии порожним поездом меньше и в большей степени зависит от скорости движения, собственных нужд поезда, климатических факторов.

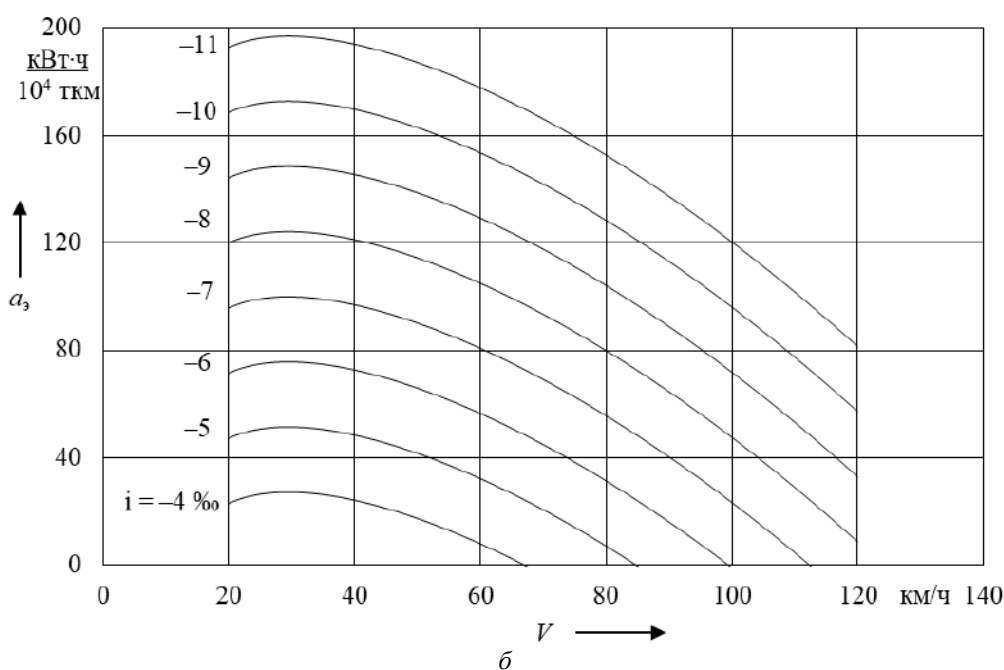
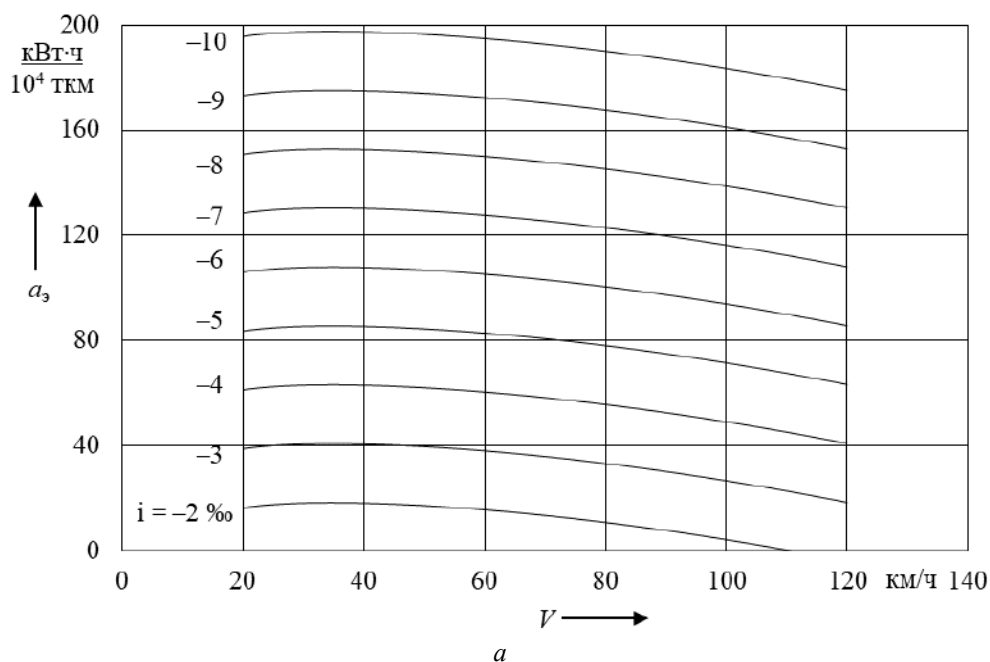
При изменении скорости движения на уклоне неизменной крутизны удельный возврат электроэнергии при рекуперативном торможении у порожнего поезда изменяется в большей степени, чем у груженого, поскольку при увеличении скорости у порожнего поезда он значительно уменьшается. Это обусловлено влиянием энергозатрат на преодоление сопротивления движению поезда и собственными нуждами электровоза на результирующий возврат электроэнергии. Максимальный возврат электроэнергии грузового груженого поезда находится в диапазоне скорости движения 20–60 км/ч, порожнего поезда – в диапазоне 20–40 км/ч.

Рассмотрим особенности возврата электроэнергии при РТ электровоза с пассажирским поездом без электроотопления вагонов (летний период) и с электроотоплением вагонов (зимний период). Состав сформирован из четырехосных

пассажирских вагонов, количество вагонов 17, масса состава 1 020 т. Масса электровоза принята равной 132 т, КПД энергетической цепи ТЭД электровоза – 0,8, мощность собственных нужд электровоза – 100 кВт, мощность электроотопления вагона – 30 кВт, мощность подвагонного генератора – 10 кВт. Остальные исходные данные взяты из [17–19].

На рис. 1 в, г приведены кривые удельно-го возврата электроэнергии в режиме РТ элек-

тровоза с пассажирским поездом массой 1 020 т в зависимости от установившейся скорости движения на спусках различной крутизны без электроотопления вагонов $a_{эбо}$ (летний период) и с электроотоплением вагонов $a_{эсо}$ (зимний период). Их анализ показывает, что при неизменной скорости движения поезда и увеличении крутизны уклона удельный возврат электроэнергии пропорционально возрастает.



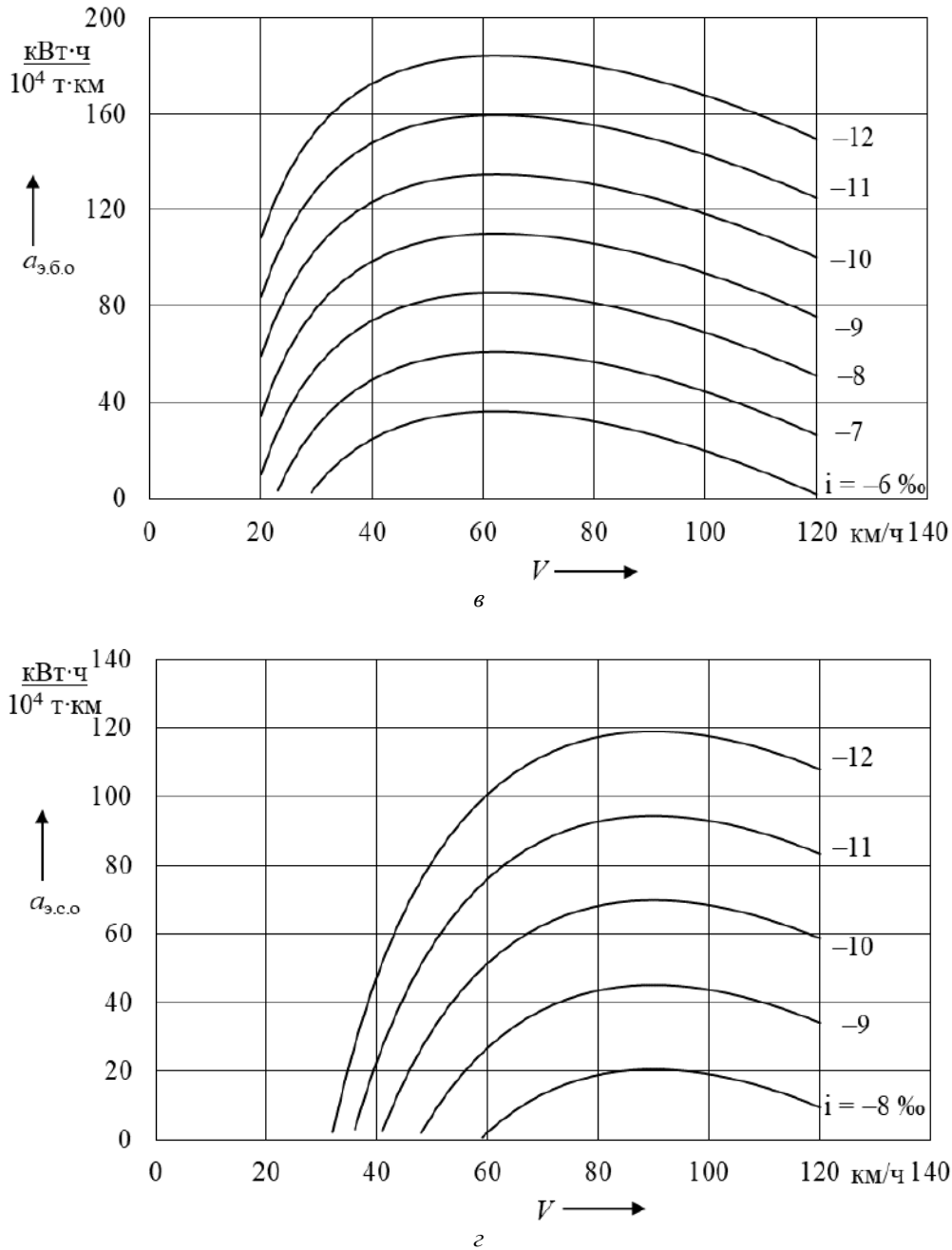


Рис. 1. Удельный возврат электроэнергии при рекуперативном торможении электровоза:
a – с грузовым груженым поездом массой 7 100 т; *б* – с грузовым порожним поездом массой 1 775 т;
в – с пассажирским поездом массой 1 020 т в летний период без электроотопления вагонов;
г – с пассажирским поездом массой 1 020 т в зимний период с электроотоплением вагонов

Fig. 1. Specific recovery of electricity during regenerative braking of an electric locomotive:
a – with a loaded freight train weighing 7 100 tons; *б* – with an empty freight train weighing 1 775 tons;
в – with a passenger train weighing 1 020 tons in summer without electric heating of wagons;
г – with a passenger train weighing 1 020 tons in winter with electric heating of wagons

На уклоне неизменной крутизны при уменьшении скорости движения удельный возврат электроэнергии пассажирским поездом при РТ в зоне высоких скоростей возрастает, достигает максимума, а в зоне низких скоростей сни-

жается. В зимний период при низкой температуре воздуха возврат электроэнергии в систему тягового электроснабжения сокращается, так как большая часть выработанной тяговыми двигателями электроэнергии потребляется собственны-

ми нуждами поезда. Такие изменения связаны с влиянием затрат энергии на преодоление основного сопротивления движению и собственные нужды поезда, прежде всего электроотопление вагонов. Максимальный возврат электроэнергии в летний период находится в диапазоне скорости движения 50–70 км/ч, а в зимний период – в диапазоне 80–100 км/ч. По сравнению с грузовым поездом возврат электроэнергии пассажирским поездом при прочих равных условиях меньше и в большей степени зависит от скорости движения, собственных нужд поезда и климатических факторов.

Для получения высокой эффективности РТ необходимым и обязательным условием, как отмечено ранее, является наличие на межподстанционной зоне не только рекуперирующего электровоза, но и электровозов в режиме тяги, которые сразу же потребляют возвращенную в тяговую сеть электроэнергию [7–12]. По данным локомотивных депо и по результатам экспериментов, относительный возврат электроэнергии достигает 10–15 %, а в некоторых случаях 50 % и более [5, 6].

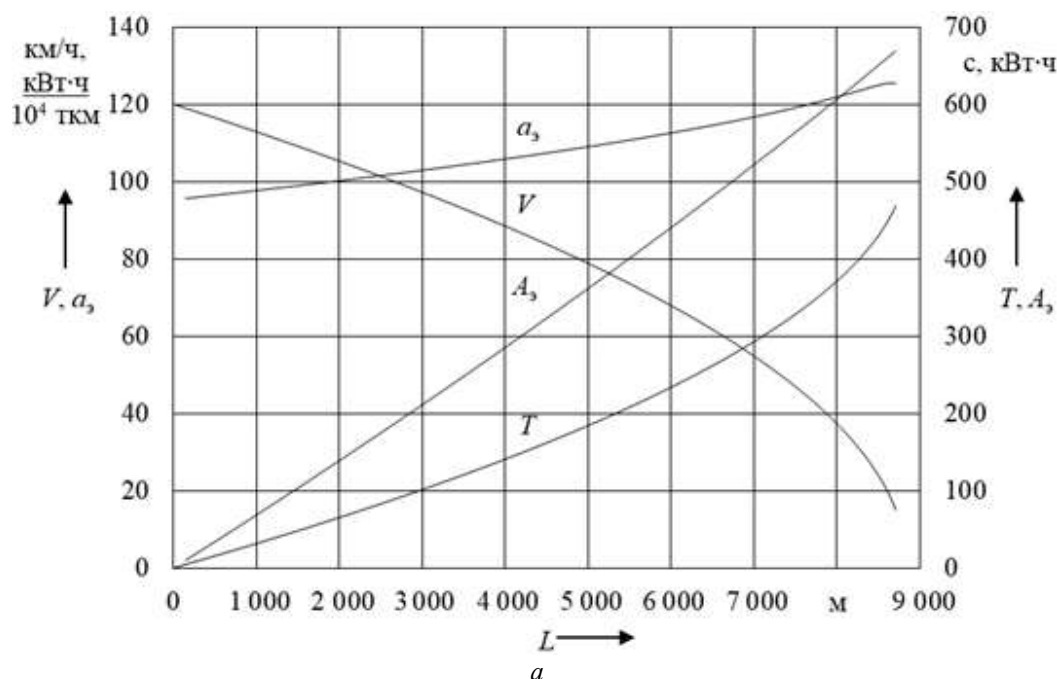
Зависимости на рис. 1, *a* имеют экстремальные значения при определенной скорости движения поезда, которую можно назвать энергооптимальной. Исследование на экстремум согласно [20, 21] кривых $a_3(V)$ показывает, что они приобретают экстремальные значения при следующих значениях скорости движения:

- грузовой поезд массой 7 100 т – 34,7 км/ч;
- грузовой поезд массой 1 775 т – 29,5 км/ч;
- пассажирский поезд без электроотопления вагонов – 56,9 км/ч;
- пассажирский поезд с электроотоплением вагонов – 87,2 км/ч [15, 16].

Рекуперативное торможение со снижением скорости движения на площадке

Наряду с экономией электроэнергии рекуперативное торможение электровозов в определенной степени позволяет повысить безопасность движения поездов. На рис. 2 приведены расчетные кривые движения грузовых поездов: груженого массой 7 100 т и порожнего массой 1 775 т, а также пассажирского поезда массой 1 020 т в режиме РТ на площадке со снижением скорости движения от 120 до 15 км/ч. В грузовых поездах предусмотрена реализация максимальной тормозной силы по сцеплению колес электровоза с рельсами, в пассажирском поезде тормозная сила электровоза принята равной 150 кН.

Анализ полученных кривых движения показывает, что в режиме РТ грузового электровоза при снижении скорости от 120 до 15 км/ч на участке пути с нулевым уклоном пройденный путь L составляет с поездом массой 7 100 т 8 807 м и массой 1 775 т – 2 579 м; время движения T – соответственно 468,6 с (7,8 мин.) и 137,2 с (2,3 мин.); средняя скорость $V_{ср}$ соответственно 68,7 и 67,7 км/ч; ускорение



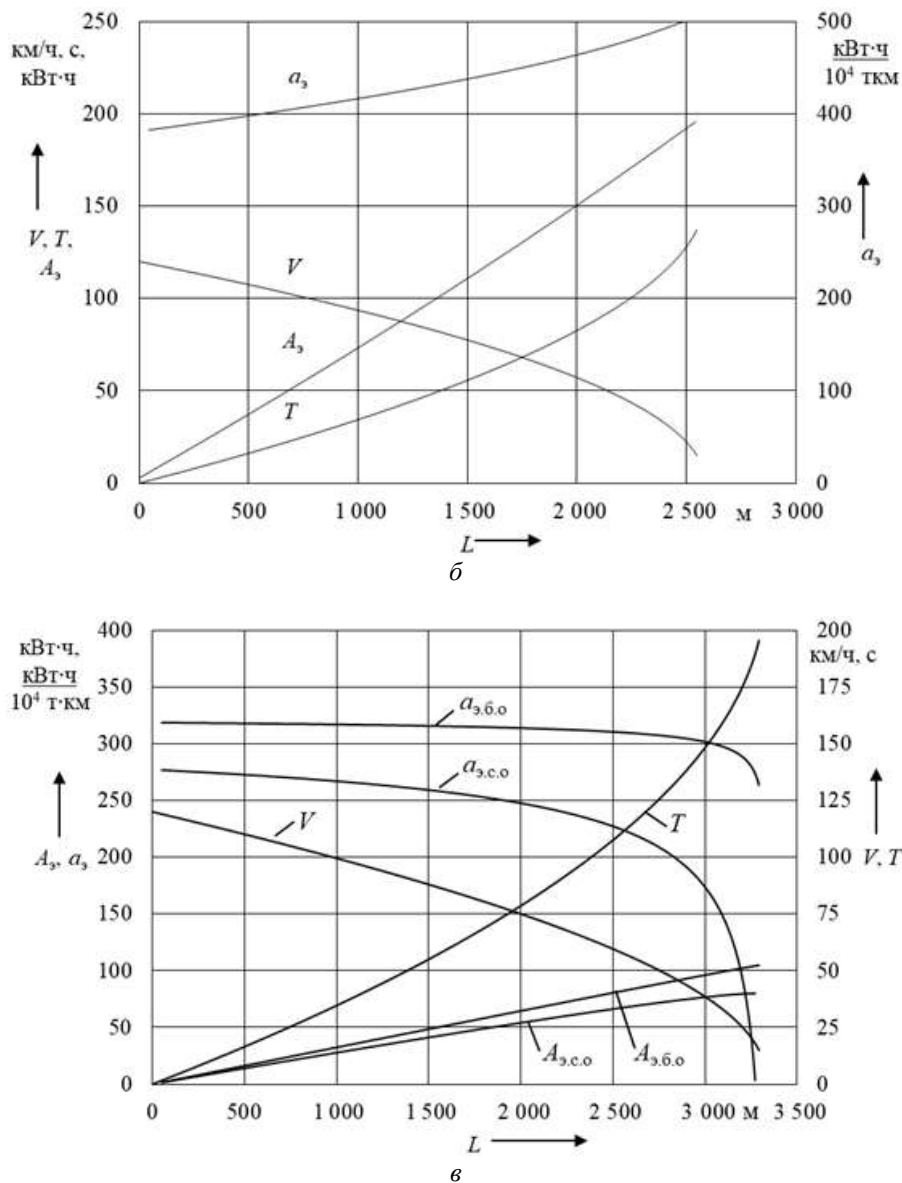


Рис. 2. Кривые движения в режиме рекуперативного торможения на площадке со снижением скорости: a – грузового груженого поезда массой 7 100 т; $б$ – грузового порожнего поезда массой 1 775 т; $в$ – пассажирского поезда массой 1 020 т

Fig. 2. Curves of movement in the mode of regenerative braking on the site with a decrease in speed: a – a loaded freight train weighing 7 100 tons; $б$ – an empty freight train weighing 1 775 tons; $в$ – a passenger train weighing 1 020 tons

(замедление) поезда и соответственно в диапазоне от $-0,061$ до $-0,065$ и от $-0,21$ до $-0,22 \text{ м/с}^2$. Полный возврат электроэнергии в тяговую сеть A_3 составляет электровозом с поездом массой 7 100 т $676,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ и массой 1 775 т – $198,0 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$; удельный возврат электроэнергии a_3 соответственно в диапазоне $95\text{--}125$ и $382\text{--}501 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км}$; расход электроэнергии на собственные нужды электровоза $A_{с.н}$ соответственно $15,6$ и $4,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

В целом можно отметить, что несмотря на снижение скорости движения, удельный возврат электроэнергии за период РТ возрастает, поскольку увеличивается тормозная сила и уменьшается сопротивление движению. При прочих равных условиях полный возврат электроэнергии режиме РТ тяжелого груженого поезда больше, чем порожнего поезда, хотя у последнего удельный возврат электроэнергии выше. РТ электровоза с поездом (особенно

большой массы) перед местами с ограничениями скорости движения целесообразно применять для снижения скорости движения в случае наличия достаточного запаса времени и расстояния до таких мест.

В режиме РТ пассажирского электровоза с поездом массой 1 020 т при снижении скорости от 120 до 15 км/ч на участке пути с нулевым уклоном пройденный путь L составляет 3 292 м; время движения T – 195,5 с (3,3 мин.); средняя скорость V_{cp} – 60,6 км/ч; ускорение (замедление) поезда u находится в диапазоне от $-0,16$ до $-0,18$ м/с². Возврат энергии в тяговую сеть без электроотопления вагонов (в летний период) $A_{э.б.о}$ составляет 106,1 кВт · ч, а с электроотоплением вагонов (в зимний период) – 81,1 кВт · ч. Удельный возврат энергии без электроотопления вагонов (в летний период) $a_{э.б.о}$ находится в диапазоне 321–279 кВт · ч/10⁴ т · км, его среднее значение – 316,0 кВт · ч/10⁴ т · км; с электроотоплением вагонов (в зимний период) $a_{э.с.о} = 279–0$ кВт · ч/10⁴ т · км, его среднее значение – 241,5 кВт · ч/10⁴ т · км. За период снижения скорости от 120 до 15 км/ч расход электроэнергии на собственные нужды электровоза $A_{с.н}$ составляет 3,7 кВт · ч, на работу подвагонных генераторов $A_{п.г}$ – 10,4 кВт · ч, на электроотопление вагонов $A_о$ – 25,0 кВт · ч. Несмотря на снижение скорости движения, удельный возврат электроэнергии за период торможения

достаточно стабильный, и только в конце торможения существенно снижается, особенно с электроотоплением вагонов, когда практически вся выработанная ТЭД электроэнергия расходуется на электроотопление вагонов и собственные нужды электровоза.

Основные результаты применения РТ для снижения скорости движения поездов приведены в табл. 1 и 2.

Анализ полученных результатов показывает, что за счет полезного использования избыточной механической энергии поезда с помощью РТ в тяговую сеть возвращается значительное количество электроэнергии, т.е. достигается существенная экономия электроэнергии на тягу поездов. При этом удельный возврат электроэнергии грузового порожнего и пассажирского поездов, имеющих сравнительно небольшую массу, находится практически на таком же уровне, как у грузового груженого поезда большой массы, т.е. энергетическая эффективность РТ поездов меньшей массы тоже достаточно высокая.

Одним из основных показателей, характеризующих безопасность движения, является длина тормозного пути. Согласно [17–19] при полном служебном торможении на площадке от скорости 120 км/ч до 0 длины тормозных путей составляют:

– грузовой груженный поезд с тормозным коэффициентом 0,33 – 2 420 м;

Таблица 1. Показатели применения рекуперативного торможения для снижения скорости движения грузовых поездов

Table 1. Regenerative braking performance indicators to reduce the speed of freight trains

Параметр Parameter	Площадка Site		Спуски Descents $i = -2 \dots -11 \text{ ‰}$	
Масса поезда m , т Train mass; m , t	7 100	1 775	7 100	1 775
Диапазон скорости V , км/ч Speed range V , km/h	120–15	120–15	20–120	20–120
Пройденный путь L , км Distance traveled L , km	8,807	2,579	–	–
Время движения T , мин. Time in motion T , min	7,8	2,3	–	–
Средняя скорость V_i , км/ч Average speed V_i , km/h	68,7	67,7	–	–
Среднее замедление u_i , м/с ² Average slowdown u_i , m/sec ²	$-0,061 \dots -$ 0,065	$-0,21 \dots -$ 0,22	0	0
Возврат электроэнергии $A_э$, кВт·ч Energy recovery $A_э$, kVt/h	676,3	198,0	–	–
Удельный возврат электроэнергии $a_э$, кВт·ч/10 ⁴ т · км Specific energy recovery $a_э$, kVt h/10 ⁴ tkm	108,2	432,5	0–200	0–200

Таблица 2. Показатели применения рекуперативного торможения для снижения скорости движения пассажирского поезда
Table 2. Regenerative braking performance indicators to reduce the speed of a passenger train

Параметр Parameter	Площадка Site		Спуски Descents $i = -6 \dots -12 \%$	
	без электрического обогрева вагонов without electric heating of wagons	с электрическим обогревом вагонов with electric heating of wagons	без электрического обогрева вагонов without electric heating of wagons	с электрическим обогревом вагонов with electric heating of wagons
Диапазон скорости V , км/ч Speed range V , km/h	120–15	120–15	20–120	20–120
Пройденный путь L , км Distance traveled L , km	3,292	3,292	–	–
Время движения T , мин. Time in motion T , min	3,3	3,3	–	–
Средняя скорость V_t , км/ч Average speed V_t , km/h	60,6	60,6	–	–
Среднее замедление u_t , м/с ² Average slowdown u_t , m/sec ²	–0,16 ... –0,18	–0,16 ... –0,18	0	0
Возврат электроэнергии A_3 , кВт·ч Energy recovery A_3 , kVt/h	104,8	79,9	–	–
Удельный возврат электроэнергии a_3 , кВт·ч/10 ⁴ т·км Specific energy recovery a_3 , kVt h/10 ⁴ t·km	312,1	238,0	0–190	0–130

– грузовой порожний поезд с тормозным коэффициентом 0,6 – 1 430 м;

– пассажирский поезд с тормозным коэффициентом 0,6 – 1 260 м.

Данные табл. 1 и 2 показывают, что длины тормозных путей при РТ значительно больше, чем при механическом торможении. Несмотря на это, РТ целесообразно применять для снижения скорости движения поезда перед участками с ограничением скорости, перед остановками, особенно при наличии запаса времени хода, а также при отказе автотормозов.

Заключение

По энергетическому балансу движения поезда можно без выполнения традиционных тяговых расчетов определить основные энергетические и кинематические показатели РТ. Их анализ показывает, что для повышения энергетической эффективности электрической тяги и безопасности движения поездов РТ целесообразно использовать не только с грузовыми тяжелыми поездами, но и с грузовыми порожними и пассажирскими поездами.

Применение РТ сокращает время хода поездов за счет большей скорости движения на спусках, повышает энергетическую эффективность электрической тяги и снижает расход электроэнергии, особенно на участках с перевальным профилем пути благодаря возврату энергии в тяговую сеть, при этом удельный возврат энергии пассажирского и грузового порожнего поездов находится практически на том же уровне, как у грузового груженого поезда.

РТ позволяет повысить безопасность движения поездов, наиболее эффективно его применять при наличии запаса времени хода для снижения скорости движения поезда перед участками с ограничением скорости, перед остановками, а также при отказе автотормозов.

Основными условиями наиболее эффективного применения РТ являются наличие потребителей электроэнергии в зоне рекуперирующего электровоза и обеспечение безьюзового торможения.

Полученные результаты показывают высокую эффективность РТ и возможность его более широкого применения на железных дорогах.

Список литературы

1. Сидорова Н.Н., Третинников О.В., Феоктистов В.П. Повышение эффективности рекуперативного торможения в электрической тяге // Наука и техника транспорта. 2015. № 1. С. 19–22.
2. Мазнев А.С., Евстафьев А.М. Повышение эффективности электроподвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2010. № 9. С. 33–36.
3. Мельниченко О.В., Газизов Ю.В. Повышение энергетических показателей электровозов // Железнодорожный транспорт. 2010. № 3. С. 50–51.
4. Сопов В.И., Штанг А.А., Спиридонов Е.А. Количественная оценка объемов энергии тяги и торможения на основе обработки экспериментальных данных // Транспортные системы Сибири : материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Красноярск, 2004. С. 143.
5. Бакланов А.А. Энергетический баланс движения для решения задач снижения расхода электроэнергии на тягу поездов // Транспорт: наука, техника, управление. 2005. № 6. С. 32–35.
6. Бакланов А.А., Швецов С.В., Шилияков А.П. Пути повышения энергоэффективности применения систем рекуперативного торможения на Красноярской железной дороге // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. Омск, 2012. С. 300–308.
7. Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Вильгельм А.С. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации // Известия Транссиба. 2016. № 1 (25). С. 60–70.
8. Никифоров М.М., Вильгельм А.С., Гутников В.И. Влияние параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на эффективность использования энергии рекуперации // Известия Транссиба. 2017. № 1 (29). С. 74–83.
9. Игин В.Н. Эффективность рекуперативного торможения // Локомотив. 2016. № 7 (715). С. 2–6.
10. Research of regenerative braking strategy for electric vehicles / V.N. Le, H.Ph. Dam, T.H. Nguyen et al. // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66. № 2. С. 105–123.
11. Обзор перспектив повышения энергетической эффективности и надёжности рекуперативного торможения на электроподвижном составе / И.А. Баринов, Д.А. Яговкин, В.С. Иванов и др. // Электропривод на транспорте и в промышленности : тр II Всерос науч.-практ. конф. Хабаровск, 2018. С. 150–156.
12. Влияние рекуперативного торможения на энергоэффективность и качество электроэнергии в системах тягового электроснабжения / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, А.В. Черепанов и др. // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 2 (58). С. 69–79.
13. Тиунов А.Ф., Тупицын О.И. Рекуперативное торможение на магистральных электровозах постоянного тока. М. : Транспорт, 1979. 102 с.
14. Капустин Л.Д., Копанев А.С., Лозановский А.Л. Особенности устройства и эксплуатации электровоза ВЛ80р. М. : Транспорт, 1979. 175 с.
15. Бакланов А.А., Шилияков А.П. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов постоянного тока // Известия Транссиба. 2019. № 2 (38). С. 23–33.
16. Бакланов А.А., Шилияков А.П. Энергетическая эффективность рекуперативного торможения грузовых электровозов // Известия Транссиба. 2021. № 4 (48). С. 11–22.
17. Астахов П.Н., Гребенюк П.Т., Скворцова А.И. Справочник по тяговым расчетам. М. : Транспорт, 1973. 256 с.
18. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М. : Транспорт, 1985. 287 с.
19. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы : распоряжение ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р (ред. 05.12.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
20. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М. : Наука, 1986. 544 с.
21. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1973. 832 с.

References

1. Sidorova N.N., Tretinnikov O.V., Feoktistov V.P. Povyshenie effektivnosti rekuperativnogo tormozheniya v elektricheskoi tyage [Increasing the efficiency of regenerative braking in electric traction]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport], 2015, no. 1, pp. 19–22.
2. Maznev A.S., Evstaf'ev A.M. Povyshenie effektivnosti elektropodvizhnogo sostava [Improving the efficiency of electric rolling stock]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2010, no. 9, pp. 33–36.
3. Mel'nichenko O.V., Gazizov Yu.V. Povyshenie energeticheskikh pokazatelei elektrovozov [Increasing the energy performance of electric locomotives]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2010, no. 3, pp. 50–51.
4. Sopov V.I., Shtang A.A., Spiridonov E.A. Kolichestvennaya otsenka ob'yemov energii tyagii tormozheniya na osnove obrabotki eksperimental'nykh dannykh [Quantitative assessment of the energy of thrust and braking based on the processing of experimental data]. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Transportnye sistemy Sibiri»* [Proceedings of the II International Scientific-Technical Conference «Transport Systems of Siberia»]. Krasnoyarsk, 2004, pp. 143.
5. Baklanov A.A. Energeticheskii balans dvizheniya dlya resheniya zadach snizheniya raskhoda elektroenergii na tyagu poezdov [The energy balance of the movement to solve problems of reducing power consumption for train traction]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: Science, Technology, Management], 2005, no. 6, pp. 32–35.
6. Baklanov A.A., Shvetsov S.V., Shilyakov A.P. Puti povysheniya energoeffektivnosti primeneniya sistem rekuperativnogo tormozheniya na Krasnoyarskoi zheleznoi doroge [Ways to improve energy efficiency the use of regenerative braking systems on the Krasnoyarsk Railway]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov»* (Proceedings of the All-Russian Scien-

tific and Technical Conference with International Participation «Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction»). Omsk, 2012, pp. 300–308.

7. Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Vil'helm A.S. Metodologiya otsenki energeticheskoi effektivnosti primeneniya rekuperativnogo tormozheniya i ispol'zovaniya energii rekuperatsii [Methodology for assessing the energy efficiency of the use of regenerative braking and the use of energy recovery]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2016, no. 1 (25), pp. 60–70.

8. Nikiforov M.M., Vil'gel'm, A.S., Gutnikov V.I. Vliyanie parametrov i rezhimov raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na effektivnost' ispol'zovaniya energii rekuperatsii [Influence of parameters and operating modes of the traction power supply system on the efficiency of using recuperation energy]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2017, no. 1 (29), pp. 74–83.

9. Igin V.N. Effektivnost' rekuperativnogo tormozheniya [Efficiency of regenerative braking]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2016, no. 7 (715), pp. 2–6.

10. Le V.N., Dam H.Ph., Nguyen T.H., Kharitonchik S.V., Kussyak V.A. Research of regenerative braking strategy for electric vehicles. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2023, vol. 66, no. 2, pp. 105–123.

11. Barinov I.A., Yagovkin D.A., Ivanov V.S., Ustinov R.I., Shramko S.G., Lin'kov A.O., Mel'nichenko O.V., Vlasevskii S.V. Obzor perspektiv povysheniya energeticheskoi effektivnosti i nadezhnosti rekuperativnogo tormozheniya na elektropodvizhnom sostave [Review of prospects for increasing energy efficiency and reliability of regenerative braking on electric rolling stock]. *Trudy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Elektroprivod na transporte i v promyshlennosti»* [Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference «Electric drive in transport and industry»]. Khabarovsk, 2018, pp. 150–156.

12. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Vliyanie rekuperativnogo tormozheniya na energoeffektivnost' i kachestvo elektroenergii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya [The influence of regenerative braking on energy efficiency and quality of electricity in traction power supply systems]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2023, no. 2 (58), pp. 69–79.

13. Tiunov A.F., Tupitsyn O.I. Rekuperativnoe tormozhenie na magistral'nykh elektrovozakh postoyannogo toka [Regenerative braking on mainline DC electric locomotives]. Moscow: Transport Publ., 1979. 102 p.

14. Kapustin L.D., Kopanov A.S., Lozanovskii A.L. Osobennosti ustroystva i ekspluatatsii elektrovoza VL80r [Features of the design and operation of the VL80r electric locomotive]. Moscow: Transport Publ., 1979. 175 p.

15. Baklanov A.A., Shilyakov A.P. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti passazhirskikh elektrovozov postoyannogo toka [Improving energy efficiency of passenger DC electric locomotive]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2019, no. 2 (38), pp. 23–33.

16. Baklanov A.A., Shilyakov A.P. Energeticheskaya effektivnost' rekuperativnogo tormozheniya gruzovykh elektrovozov [Energy efficiency of regenerative braking of freight electric locomotives]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2021, no. 4 (48), pp. 11–22.

17. Astakhov P.N., Grebenyuk P.T., Skvortsova A.I. Spravochnik po tyagovym raschetam [Handbook of traction calculations]. Moscow: Transport Publ., 1973. 256 p.

18. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty [Traction rules for train operation]. Moscow: Transport Publ., 1985. 287 p.

19. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 12.05.2016 № 867r «Ob utverzhdenii pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» (red. 05.12.2023) [Order of JSC «Russian Railways» dated May 12, 2016 no. 867r «On approval of the rules of traction calculations for train operation» (ed. December 5, 2023)].

20. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov [Handbook of Mathematics for engineers and students of higher technical education organizations]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 544 p.

21. Korn G.A., Korn T.M. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow: Nauka Publ., 1973. 832 p.

Информация об авторах

Бакланов Александр Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: aleksbakl@mail.ru.

Шильяков Андрей Петрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: ShilyakovAP@omgups.ru.

Information about the authors

Alexandr A. Baklanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: aleksbakl@mail.ru.

Andrei P. Shilyakov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: ShilyakovAP@omgups.ru.

Маршрутизация контейнерных поездов в современных условиях

С.О. Литвинцев✉, И.О. Лобыцин, М.В. Кудрявцева, Н.М. Богуславская

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), г. Москва, Российская Федерация

✉Litvintsev.Sergey@vniizht.ru

Резюме

В статье рассматривается проблема развития контейнерных перевозок в современных условиях. С целью прогнозирования их объема авторами был выполнен конструктивный анализ доли контейнерных перевозок за последние два года. Исследованы применяемые методы организации контейнерных перевозок, на основе которых выявлены недостатки соответствующей перевозочной деятельности. Рассмотрена динамика транспортировки грузов в контейнерах в период обострения геополитической обстановки в мире и давления со стороны Запада санкциями (перераспределение логистики грузов и результаты введения санкций). В ходе анализа уровня развития контейнеризации возникла необходимость разработки новых технологий. Проведена оценка наличной пропускной способности основных устройств и сооружений, загруженных участков Восточного полигона с помощью методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования. Выявлены главные факторы, негативно влияющие на общую логистику грузов, приводящие к дополнительным простоям и непроизводительному занятию инфраструктуры. Для сокращения сроков доставки грузов авторами рассмотрено одно из предложенных решений по созданию на сети железных дорог уточненной модели маршрутизации контейнерных поездов с добавлением картежа групп элементов модели в общую структуру. С помощью имитационного моделирования построены прогнозные графики движения поездов для обнаружения факторов, влияющих на движение поездопотока длинносоставных поездов. Представлены варианты формирования контейнерного шаттла, которые при организации таких перевозок дадут положительный эффект.

Ключевые слова

транспортная логистика, контейнерные перевозки, контейнерный поезд, контейнерный шаттл, инфраструктурные ограничения

Для цитирования

Маршрутизация контейнерных поездов в современных условиях / С.О. Литвинцев, И.О. Лобыцин, М.В. Кудрявцева, Н.М. Богуславская // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 52–66. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).52-66.

Информация о статье

поступила в редакцию: 23.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 05.09.2024 г.; принята к публикации: 09.09.2024 г.

Routing of container trains in modern conditions

S.O. Litvintsev✉, I.O. Lobytsin, M.V. Kudryavtseva, N.M. Boguslavskaya

Scientific and Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT), Moscow, the Russian Federation

✉Litvintsev.Sergey@vniizht.ru

Abstract

The article examines the problem of the development of container transportation in modern conditions. To predict the volume of container traffic, the authors performed a constructive analysis of the share of container traffic over the past 2 years. Research has been carried out on the methods used to organize container transportation, based on which their shortcomings have been identified. The dynamics of cargo transportation in containers during the current geopolitical situation in the world and pressure from sanctions are considered (what redistribution of cargo logistics has occurred and what the imposed sanctions will lead to). During the analysis of the level of development of containerization, the need arose to develop new technologies. An analysis of the available throughput and carrying capacity of the main devices and structures, loaded sections of the Eastern polygon was carried out using a methodology for determining the throughput and carrying capacity of the public railway transport infrastructure. The authors present the main factors that negatively affect overall cargo logistics and lead to additional downtime and non-productive use of infrastructure. One of the options for reducing the time of cargo delivery was proposed by the authors as an innovative solution - the creation of a fundamentally new model for routing container trains on the railway network. Using simulation modeling, the authors constructed predictive train traffic schedules to identify factors that influence the progress of train flow of long trains. The authors proposed options for the formation of a container shuttle, which will lead to a positive effect from the organization of such transportation.

Keywords

transport logistics, container transportation, container train, container shuttle, infrastructure limitations

For citation

Litvintsev S.O., Lobytsin I.O., Kudryavtseva M.V., Boguslavskaya N.M. Marshrutizatsiya konteynernykh poezdov v sovremennykh usloviyakh [Routing of container trains in modern conditions]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 52–66. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).52-66.

Article info

Received: April 23, 2024; Revised: September 5, 2024; Accepted: September 9, 2024.

Введение

Распределение товарооборота в мире, а именно его транзит, постоянно находится в режиме острой конкуренции. Масштабная тенденция борьбы за грузопотоки после анонсирования Китаем инициативы «Один пояс – один путь» получила новый толчок развития контейнеризации в мировой логистике грузов. Значимость контейнерных перевозок повышается за счет того, что именно они являются оптимальным способом транспортировки товаров в евразийском транзите.

Контейнерные перевозки (или контейнеризация) – одно из направлений технического прогресса в организации перевозок, складировании и хранении грузов, способствующее рационализации и оптимизации транспортных процессов.

Перевозки контейнеров имеют ряд преимуществ по сравнению с обычными видами транспортировки: способность комбинирования грузов, безопасность и сохранность перевозимой продукции, высокая мобильность, возможность использовать различные виды транспорта для логистики, конкурентная себестоимость.

Целью данной статьи является применение технологии контейнерного шаттла при формировании контейнерных перевозок с добавлением картежа групп элементов модели в общую структуру. Проведение подобного анализа необходимо, так как существует проблема формирования контейнерных поездов на сети железных дорог РФ. Логистическая система недостаточно развита, поэтому возникают потери в части привлечения дополнительных объемов грузов при транспортно-логистическом обслуживании и невозможность увеличения сроков их доставки. Итак, необходимо:

– рассмотреть формирование контейнерных поездов, где на станциях работает не один контейнерный оператор;

– выяснить, почему увеличилось время простоя вагонов с контейнерами в ожидании накопления составов до установленной услов-

ной длины, где время накопления достигает более 9 сут;

– определить влияние нагрузки на железнодорожную инфраструктуру, на пропускную и провозную способности [1–8].

Структурный анализ контейнерных перевозок

Тренд на повышение перевозок грузов в контейнерах, заданный еще в 2017 г., показывал бурный рост вплоть до 2021 г. В этот период только внутри России данные перевозки выросли более чем в 1,7 раза (было перевезено 43,9 млн т в 2017 г. и 73,2 млн т в 2021 г.). В рассматриваемый период существенно расширилась номенклатура грузов, были организованы первые перевозки угля в контейнерах типа Open top, в том числе в международном сообщении [9, 10].

В 2022 г. из-за сложной геополитической обстановки в мире и давления санкций, в том числе на логистику грузов, динамика перевозок грузов в контейнерах приняла отрицательное значение (в данном случае рассматриваются перевозки всеми видами транспорта). Изменения затронули в основном импорт (сокращение составило 12 %, или 2,1 млн двадцатифутовый эквивалент (ДФЭ)), экспорт – сокращение на 25 % или свыше 1,5 млн ДФЭ, а также транзитные перевозки – снижение на 23 % или около 750 тыс. ДФЭ. Объем перевозок грузов в контейнерах внутри России по отношению к 2021 г. практически не изменился. Основная черта данного периода – переориентация рынка с запада на восток. Вследствие введения санкций ведущими западными странами в отношении российского рынка произошло перераспределение логистики грузов с северо-западных портов на порты Дальнего Востока, что привело к поиску новых логистических решений [11–13].

Сложившаяся ситуация увеличила нагрузку на железнодорожную инфраструктуру страны. Контейнерные перевозки на сети ОАО «РЖД» в 2022 г. обновили рекорд и

достигли 6,521 млн ДФЭ, что на 0,3 % больше показателей 2021 г.

В 2023 г. объемы перевозок грузов в контейнерах по железным дорогам нашей страны продолжили тренд на увеличение. Более 7,44 млн ДФЭ груженых и порожних контейнеров было перевезено во всех видах сообщения, что на 14,1 % больше аналогичного периода прошлого года.

Изменение и переориентация транспортных потоков затронула не только грузы в контейнерах, но и практически всю номенклатуру, что привело к ограничениям железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона. На рис. 1 представлена диаграмма провозной способности полигона в разрезе нескольких лет (количество перевезенных тонн груза через полигон).

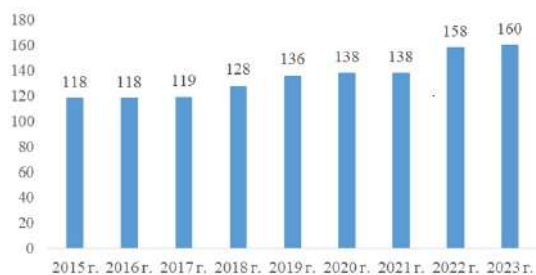


Рис. 1. Диаграмма провозной способности Восточного полигона в 2015–2023, млн т

Fig. 1. Diagram of the carrying capacity of the Eastern polygon in 2015–2023, million tons

Согласно представленному анализу, рост провозной способности исследуемого участка железных дорог наблюдается в последние два года. Стоит отметить, что количество перевозимого груза увеличилось более чем на 36 % относительно 2015 г. и на 16 % относительно 2021 г. без существенных и дополнительных вложений в развитие железнодорожной инфраструктуры [14].

Анализ пропускной и провозной способностей инфраструктуры

Пропускные возможности сети железных дорог ограничены и уже сейчас достигают своего пикового потенциала в части объемов перевозок пассажиров и грузов. С помощью методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования (приказ Минтранса России № 266 от 18 июля 2018 г.) была проана-

лизирована наличная пропускная способность основных устройств и сооружений наиболее загруженных участков Восточного полигона.

В зависимости от технической оснащенности исследуемых участков формула определения наличной пропускной способности перегонов следующая (пар поездов в сутки):

1. Для двухпутных участков:

$$n_{\text{нал.}} = \frac{(1440 - t_{\text{тек.}}) \cdot \alpha_{\text{н}}}{I_p}$$

2. Для однопутных участков (частично-пакетный график движения):

$$n_{\text{чп}} = \frac{2 \cdot (1440 - t_{\text{тек.}}) \cdot \alpha_{\text{н}}}{(2 - \alpha_{\text{п}}) \cdot T_{\text{пер.}} + (I'_p + I''_p) \cdot \alpha_{\text{п}}}$$

пар поездов в сутки.

3. Для однопутных участков (парный непакетный график движения):

$$n_{\text{нал}} = \frac{(1440 - t_{\text{тек.}}) \cdot \alpha_{\text{н}}}{T_{\text{пер.}}} = \frac{(1440 - t_{\text{тек.}}) \cdot \alpha_{\text{н}}}{t' + t'' + \tau_a + \tau_b}$$

где I – межпоездной интервал, мин.; $T_{\text{пер.}}$ – период графика движения, мин.; $t_{\text{тек.}}$ – продолжительность суточного бюджета времени, выделяемого для производства планово-строительных работ, мин.; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент, учитывающий надежность работы технических средств (инфраструктуры и подвижного состава); $\alpha_{\text{п}}$ – коэффициент пакетности.

На двухпутных линиях расчет ведется на основе применения только пакетного графика движения поездов, а на однопутных линиях – обоих типов графика в зависимости от средств связи и сигнализации по движению поездов.

Межпоездные и станционные интервалы приняты в соответствии с формами ЦД-4а и ЦД-4 к графику движения поездов на 2022–2023 гг.

Времена хода грузовых и пассажирских поездов и интервалы безостановочного скрещения приняты на основе анализа действующего графика движения поездов на 2022–2023 гг.

При этом продолжительность технологического окна равна: на двухпутных участках – 150 мин.; на однопутных участках – 75 мин.; на участках однопутных с двухпутными вставками – 90 мин.

Коэффициент надежности ($\alpha_{\text{н}}$) равен:

– на двухпутной линии при электротяге – 0,96, при тепловозной тяге – 0,95;

– на однопутных линиях, имеющих отдельные двухпутные перегоны или вставки, при электротяге – 0,95, при тепловозной тяге – 0,94;

– на однопутной линии при электротяге – 0,93, при тепловозной тяге – 0,92.

Произведенные расчеты исследуемых участков представлены в табл. 1.

Из произведенных исследований видно, что по ключевым маршрутам следования контейнерных поездов (Восточный полигон) допустимый коэффициент заполнения превышает 0,9. Коэффициент использования мощности на

Таблица 1. Фактический и перспективный коэффициент использования мощности, резерв железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона

Table 1. Actual and prospective capacity utilization factor, the reserve of the railway infrastructure of the Eastern polygon

№ п/п	Наименование ж/д участков Name of railway sections	Расчетные годы Estimated years	Количество путей Number of tracks	Коэффициент использования мощности Capacity utilization factor	Допустимый коэффициент заполнения наличной пропускной способности Allowable fill factor of available throughput capacity	Резерв пар грузовых поездов в сутки Reserve of freight train pairs per day
1	Тайшет – Улан-Удэ Taishet – Ulan-Ude	2022	2	0,96	0,97	5
2	Улан-Удэ – Карымская Ulan-Ude – Karymskaya	2022	2	0,84	0,97	16
3	Карымская – Бамовская Karymskaya – Bamovskaya	2022	2	0,768	0,97	20
4	Бамовская – Белогорск Bamovskaya – Belogorsk	2022	2	0,870	0,97	10
5	Белогорск – Известковая Belogorsk – Izvestkovaya	2022	2	0,912	0,97	8
6	Известковая – Волочаевка Izvestkovaya – Volochayevka	2022	2	0,817	0,97	19
7	Волочаевка – Смоляниново (Искл) Volochayevka – Smolyaninovo (Excl.)	2022	2	0,827	0,97	16
8	Смоляниново – Находка Smolyaninovo – Nakhodka	2022	2	0,684	0,97	20
9	Улан-Удэ (Заудинский) – Наушки Ulan-Ude (Zaudinskii) – Naushki	2022	1	0,73	0,9	3
10	Карымская (Тарская) – Забайкальск Karymskaya (Tarskaya) – Zabaikalsk	2022	1,2	0,804	0,97	6
11	Уссурийск (Воздвиженский) – Гродеково Ussuriisk (Vozdvizhensky) – Grodekovo	2022	1	0,743	0,9	4
12	Надеждинская (Угольная) – Владивосток Nadezhdinskaya (Ugol'naya) – Vladivostok	2022	2	0,636	0,97	16
13	Барановский – Хасан Baranovskii – Khasan	2022	1	0,713	0,97	1

основных железнодорожных участках Восточного полигона варьируется от 0,7 до 0,96. Полученные результаты расчетным путем подтверждают главную проблему как логистики международных грузоперевозок в целом, так и перспективы развития контейнерных перевозок

на сети железных дорог РФ – инфраструктурные ограничения пропускной способности.

Реконструкция инфраструктуры Восточного полигона

В 2023 г. Восточный полигон попадает в федеральную программу развития и становится

Таблица 2. Анализ отправления контейнерных поездов со станции Забайкальск за 2023 г.
Table 2. Analysis of container train departures from Zabaikalsk station for 2023

Станция отправления Departure station	Станция назначения Destination station	Количество контейнерных поездов Number of container trains	Условная длина поезда Conventional train length
Забайкальск Zabaikal'sk	Московский транспортный узел Moscow transport hub	641	284 поезда (trains) – 57 усл. ваг. (conventional wagons)
			56 поездов – 71 усл. ваг.
			301 поезд – от 119 усл. ваг.*
	Батарейная Batarejnaya	6	3 поезда – 57 усл. ваг.
			2 поезда – 71 усл. ваг.
			1 поезд – от 119 усл. ваг.*
	Базаиха Bazaikha	8	6 поездов – 57 усл. ваг.
			2 поезда – 71 усл. ваг.
			–
	Шушары Shushary	105	64 поезда – 57 усл. ваг.
			15 поездов – 71 усл. ваг.
			31 поезд – от 119 усл. ваг.*
	Екатеринбург Ekaterinburg	57	36 поездов – 57 усл. ваг.
			3 поезда – 71 усл. ваг.
			18 поездов – от 119 усл. ваг.*
	Магнитогорск Magnitogorsk	4	4 поезда – 57 усл. ваг.
	Клещиха Kleshchikha	26	14 поездов – 57 усл. ваг.
			3 поезда – 71 усл. ваг.
			9 поездов – от 119 усл. ваг.*
	Ульяновск Ul'yanovsk	10	8 поездов – 57 усл. ваг.
–			
2 поезда – от 119 усл. ваг.*			
Лагерная Lagernaya	1	1 поезд – 57 усл. ваг.	
Злынка Zlynka	1	1 поезд – 57 усл. ваг.	
Нижнекамск Nizhnekamsk	5	4 поезда – 57 усл. ваг.	
		1 поезд – 71 усл. ваг.	
Брест Brest	6	5 поездов – 57 усл. ваг.	
		1 поезд – от 119 усл. ваг.	
Краснодар Krasnodar	1	1 поезд – 71 усл. ваг.	
Жодио Zhodino	16	8 поездов – 57 усл. ваг.	
		8 поездов – от 119 усл. ваг.	
Колядичи Kolyadichi	229	138 поездов – 57 усл. ваг.	
		14 поездов – 71 усл. ваг.	
		77 поездов – от 119 усл. ваг.*	

* Объединенные поезда, идущие на данную станцию, либо один поезд длиной 71 усл. ваг., идущий на указанную станцию назначения, а второй от 57 усл. ваг. – на попутную или близлежащую станцию.

* Combined trains going to this station, or one train with a length of 71 (conventional wagons) going to the specified destination station, and the second from 57 (conventional wagons) – to a passing or nearby station.

одним из ключевых российских транспортных инфраструктурных проектов. На развитие Байкало-Амурской магистрали и Транссиба в 2023–2025 гг. программой предусмотрено выделение более 788,3 млрд р. Данные мероприятия позволят увеличить провозную способность сети дорог, а в 2024 г. благодаря проводимой модернизации инфраструктуры Восточного полигона провозная способность по нему должна составить 180 млн т в год.

Проведение работ по модернизации инфраструктуры является необходимой мерой в существующих реалиях. Однако увеличивать количество путей, их полезную длину, строить дополнительно целые железнодорожные линии можно до бесконечности и при этом не получать ожидаемого эффекта. Следовательно, уже сейчас необходимо рассчитывать резервы пропускной способности и возможности в увеличении объемов перевозок за счет оптимизации нормативной документации и разработки принципиально новых транспортно-логистических технологических решений.

Ранее уже проводился структурный анализ сегмента контейнерных перевозок как одного из самых востребованных на сегодняшний день [14]. Прошлые исследования отчетливо показали, что в 2019–2020 гг. более 80 % контейнерных поездов проходили со станций отправления Забайкальской и Дальневосточной железных дорог до станций Московского транспортного узла составностью в 57 усл. ваг. На основании расчетов было отмечено, что сеть дорог ОАО «РЖД», в большей степени Восточный полигон, обладает потребными резервами пропускной способности для увеличения контейнерных перевозок грузов.

В итоге за счет проведения технологических и правовых мероприятий есть возможность увеличить существующие перевозки более чем на 25–30 % к существующим объемам без дополнительных вложений в инфраструктуру [14].

Анализ отправления контейнерных поездов со станции Забайкальск

Аналогичные исследования были проведены и в этом году. Они показали, что за 2022–2023 гг. были выполнены технологические мероприятия, направленные на увеличение провозной способности на данных участках железнодорожной сети. В табл. 2 представлены ре-

зультаты анализа отправления контейнерных поездов в 2023 г. со ст. Забайкальск Забайкальской железной дороги.

На ст. Забайкальск начинают активно формировать соединенные поезда, но при этом доля контейнерных поездов длиной 71 усл. ваг. осталась небольшой. Наглядно данные результаты исследований представлены на рис. 2.

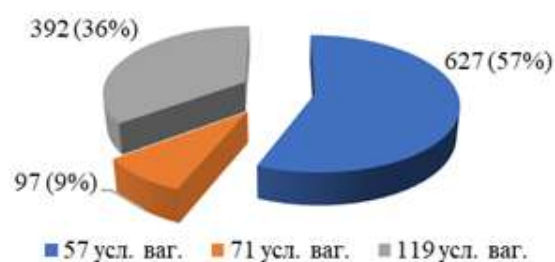


Рис. 2. Количество отправленных контейнерных поездов со станции Забайкальск в 2023 г. и их условная длина, усл. ваг.

Fig. 2. Number of container trains sent from Zabaikal'sk station in 2023 and their conditional length, conventional wagons

Из диаграммы видно, что более 57 % поездов были отправлены условной длиной 57 вагонов, средняя дальность таких маршрутов превышает 6 500 км.

Тариф при перевозке одного вагона с контейнерами, погруженными импортным грузом, составляет 243 тыс. р. Формула расчета финансовых потерь ОАО «РЖД» при существующей системе организации перевозок грузов в составе контейнерных поездов (EN) представлена ниже:

$$EN = \frac{\sum N_{\text{кон.}}}{m} \cdot k \cdot E,$$

где $\sum N_{\text{кон.}}$ – количество отправленных контейнеров, ДФЭ; m – количество контейнеров в составе контейнерного поезда; k – поправочный коэффициент, показывающий долю контейнерных поездов от общего количества отправленных контейнеров; E – потеря доходов за тариф от перевозки грузов при отправлении контейнерных поездов 57 усл. ваг. в сравнении с поездом в 71 усл. ваг. (млн р.).

В итоге сумма финансовых потерь при отправлении неполносоставных поездов с Забайкальской железной дороги составила $EN = 2,13$ млрд р. [3].

В 2023 г. ОАО «РЖД», а также контейнерные операторы недополучили более 2 млрд

р. от отправления поездов условной длиной 57 вагонов в условиях инфраструктурных ограничений Восточного полигона [15].

Принятие консервативного решения

В качестве технологической меры по увеличению пропускной и провозной способностей в данной ситуации было принято консервативное решение со стороны перевозчика. В IV квартале 2023 г. ОАО «РЖД» информировало всех грузо-владельцев и операторов подвижного состава о том, что с 10 декабря 2023 г. в графике движения контейнерных поездов, формируемых на станциях Восточного полигона (Забайкальской, Красноярской, Восточно-Сибирской, Дальневосточной железных дорог и АО «АК «Железные дороги Якутии»), в том числе формируемых и в их адрес, устанавливается минимальная длина железнодорожного состава 71 усл. ваг. При этом допускается исключение при формировании отдельных международных поездов, определенных в протоколах совещаний уполномоченных членов таможенных комиссий и железнодорожных администраций [16].

Вместе с тем метод объединения контейнерных поездов в 2023 г. (более 36 % поездов, или 329 объединенных контейнерных поездов от общего количества отправленных со ст. Забайкальск) также был растиражирован по всей сети железных дорог.

Данные меры привели к существенному увеличению объема контейнерных перевозок по сети ОАО «РЖД». За первые два месяца 2024 г. контейнерные перевозки во всех видах сообщения по сети железных дорог достигли 1,25 млн ДФЭ, что на 11 % превышает объем аналогично го периода прошлого года.

Количество импортных контейнеров, вывезенных с Дальнего Востока в феврале 2024 г., достигло нового рекорда – 3,5 тыс. ДФЭ в сут, обновлен рекорд по вывозу контейнеров в полувагонах – 1 680 ДФЭ за сут, об этом сообщил замглавы ОАО «РЖД» Михаил Глазков на брифинге для грузоотправителей. По его словам, для освоения дополнительного объема перевозок в условиях дефицита пропускных способностей Восточного полигона продолжается системная работа по вождению объединенных контейнерных поездов – в восточном направлении с начала года проследовало более 500 таких составов [16].

Факторы, влияющие на логистику грузов

С другой стороны были поставлены не менее важные фундаментальные показатели логистики:

1. Некоторые пограничные переходы и крупные узловые станции ОАО «РЖД» до сих пор не имеют достаточно развитую инфраструктуру для приема и формирования контейнерных поездов длиной 71 усл. ваг. и более (ст. Ступино, Благовещенск, Белгород, Томск-1, Мыс-Астафьева, Артем-Приморский, Находка, Первая Речка, Рыбники, Блюхер, Гродеково и др.).

2. Многие контейнерные маршруты, по которым ранее проходили контейнерные монопоезда из Китая, перестали быть экономически целесообразными. Такие контейнерные маршруты, как Забайкальск – Ульяновск, Забайкальск – Лагерная, Забайкальск – Екатеринбург и другие не являются регулярными. Из-за того, что из Китая поступает контейнерный поезд не более 57 усл. ваг., а ожидать следующего под накоплением на этом же направлении приходится более двух-трех недель, данная перевозка становится нерациональной с точки зрения сроков доставки грузов. Помимо этого, отправлять контейнерный поезд длиной 57 усл. ваг. можно только без применения тарифной отметки 05, а, следовательно, скидка на отправку такого маршрутного контейнерного поезда не распространяется, что приводит к повышению железнодорожного тарифа более чем на 40 %. Как результат, только за три месяца действия нового правила более 30 % контейнерных маршрутов стали неэффективными и были исключены или переориентированы на альтернативные виды транспорта.

3. Сегодня, учитывая инфраструктурные ограничения, ни один китайский сухопутный пограничный переход не способен в полном объеме на протяжении продолжительного времени принимать контейнерные поезда условной длиной более 57 вагонов без снижения своей пропускной способности и увеличения простоев под технологическими операциями, что приводит к дестабилизации работы российских железнодорожных пограничных переходов (ЖДПП) [17].

Данные факторы, безусловно, негативно сказываются на общей логистике грузов, влекут за собой дополнительные простои и несвязанное с производством занятие инфраструктуры,

а на некоторых маршрутах приводят к увеличению времени накопления контейнерных поездов на терминалах от суток до недели.

Достигнутое увеличение общего перевезенного объема контейнеров за счет вождения объединенных контейнерных поездов также имеет и негативную сторону для других категорий поездов.

Определение влияния на продвижение длинносоставных поездов

Были проведены исследования на предмет достаточности инфраструктуры Восточного полигона для увеличения пропускной способности объединенных поездов по участкам. В результате получен вывод, что поезда длиной 72–74 усл. ваг. могут составлять ядро поездопотока и не будут являться лимитирующим элементом в пропускной способности.

Наибольшее лимитирующее влияние оказывает категория поездов длиной более 85 усл. ваг. – это объединенные контейнерные поезда и маршруты из порожних полувагонов, следующие в нечетном направлении к фронтам погрузки. Именно в этом случае наиболее ярко выражена недостаточная оснащённость участков, прежде всего длина приемоотправочных путей на технических станциях.

Для обнаружения факторов, оказывающих влияние на продвижение поездопотока длинносоставных поездов, соответствующих нормативу максимальной длины – 85 усл. ваг., с помощью имитационного моделирования были построены прогнозные графики движения поездов. За исходный вариант принят график, сформированный в соответствии с исполненным графиком движения поездов на участке Петровский Завод – Тарская (Карымская) Забайкальской железной дороги по состоянию на 3–4 июля 2023 г. (рис. 3). Моделирование прогнозных вариантов графиков проведено в автоматизированном программном комплексе (АПК) «Эльбрус» с учетом нормативного расписания пассажирских и пригородных поездов и фактически состоявшихся за 4 рассматриваемый период «окон».

Рассмотрены вариации пропускной способности поездопотока с увеличением количества длинносоставных поездов до 10, 20 и 30 в сутки без учета дополнительных факторов влияния. На основании анализа исполненного графика движения поездов размеры движения за рассматриваемый период с 18:00 мск 3 июля по 18:00 мск 4 июля в четном направлении составили 78 грузовых поездов, участковая скорость на участке Петровский Завод – Тарская составила 28,4 км/ч.



Рис. 3. Моделирование прогнозного графика на основании исполненного графика движения поездов на участке Петровский Завод – Тарская (Карымская) Забайкальской железной дороги

Fig. 3. Modeling of the forecast schedule based on the completed train schedule on the section Petrovsky Zavod – Tarskaya (Karymskaya) of the Trans-Baikal Railway

На исходном варианте прогнозного графика движения поездов, построенного с помощью АПК «Эльбрус», пропуск составил 78 четных поездов в сутки, что соответствует количеству фактически пропущенных поездов за данный период времени. Участковая скорость составила 39,4 км/ч., что на 11 км/ч. больше исполненного. При фиксированной прокладке в исходном варианте 10 четных длинносоставных поездов длиной 85 усл. ваг. размеры движения сократились до 71 поезда в сутки, а согласно аналитическим данным, участковая скорость выросла до 43,3 км/ч. (+3,9 км/ч. к исходному варианту).

При увеличении в исходном варианте количества длинносоставных поездов до 20, согласно аналитическим данным, размеры движения сократились до 64 поездов в сутки, а участковая скорость увеличилась до 44,7 км/ч. При увеличении количества длинносоставных поездов до 30 размеры движения сократились до 61 четного поезда в сутки, а участковая скорость выросла до 45 км/ч.

Изменение скорости и размеров движения контейнерных поездов напрямую связано с длиной поездов. В большинстве случаев длина путей на промежуточных станциях меньше 85 усл. ваг., что не позволяет беспрепятственно для движения останавливать на них длинносоставные поезда. Поэтому в АПК «Эльбрус» построение производится без остановки на участках, что приводит к увеличению скорости движения. С увеличением количества таких поездов сокращается возможность регулировки их продвижения на участке (расстановка под обгон пассажирскими и др.). В этом случае поезда должны следовать без остановок от одной технической станции до другой. Кроме того, алгоритмы построения таковы, что поезда, которые не вписываются в технологию, не могут иметь остановку у входных светофоров станций и исключаются из графика.

В последнее время технические станции в результате реконструкций получили возможность беспрепятственного пропуска определенного количества грузовых поездов длиной 85 усл. ваг. Однако они не могут обеспечивать длинносоставное движение в требуемых размерах.

При достижении максимальных возможностей станции по пропуску длинносоставных поездов (для каждой станции определяется ин-

дивидуально) дальнейшее их увеличение приведет не только к сокращению размеров движения, но и к снижению участковой скорости. Также на пропускную способность технических станций влияет не только количество длинносоставных поездов, но и их длина. Особенно лимитирующее влияние оказывают поезда длиной более 100 усл. ваг.

Следует добавить еще один фактор влияния длины поезда на эксплуатационную работу. При разработке нормативного графика движения поездов на текущий год на участке Петровский Завод – Карымская предусмотрено 45 ниток для поездов массой 7 100 т. Они предназначены для увеличения объемов вывоза угля из погрузочных районов Кузбасса в порты Дальнего Востока. Для выполнения унифицированной длины 71 усл. ваг. указанные составы должны формироваться из инновационных вагонов с нагрузкой 25 т на ось. Фактически в составы маршрутов включаются вагоны с нагрузкой 23,5 т на ось, что приводит к увеличению длины поезда до 75 усл. ваг.

Принятые меры по установлению минимальной условной длины контейнерных поездов, а также по вождению объединенных контейнерных поездов дали эффект только в узком сегменте логистики, но если рассматривать проблему шире, то отрицательных факторов от принятия подобных решений в какой-то мере больше, чем положительных.

Для решения задачи формирования и отправления контейнерных поездов с условной длиной 71 вагон без дополнительных сопутствующих негативных факторов могут стать существенные изменения логистического подхода к формированию таких поездов.

Контейнерный шаттл

Ранее уже рассматривалось формирование контейнерных шаттлов несколькими способами. Но данные способы не были до конца изучены, поэтому требуется уточнение использования контейнерных шаттлов на примере применения отправления контейнерных поездов с ключевых станций их формирования на сети дорог РФ [18].

Для развития контейнерных перевозок необходимо внести корректировки в нормативную документацию по вопросу определения контейнерного поезда и принципов его формирования на сети железных дорог ОАО «РЖД». Такой шаг позволит внедрить на рынок транс-

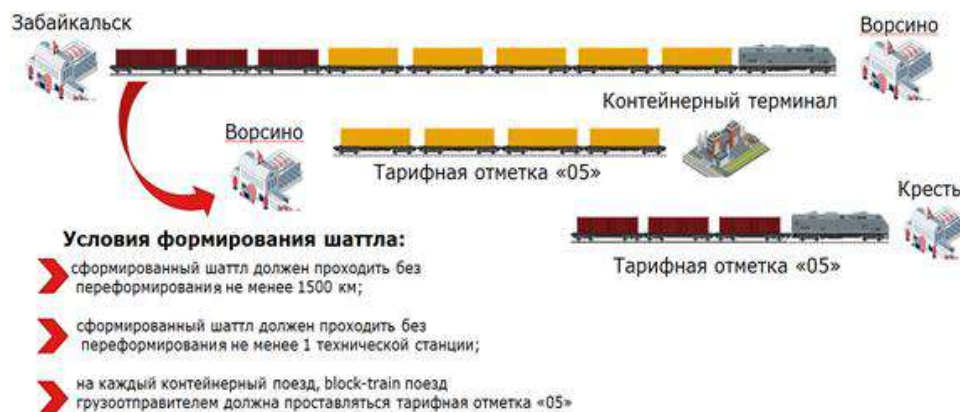


Рис. 4. Формирование контейнерного шаттла
Fig. 4. Formation of a container shuttle

портных услуг комплексный сервис по отправлению вагонов с контейнерами в составе контейнерных шаттлов.

Контейнерный шаттл – сформированный состав, состоящий из нескольких контейнерных или block-train поездов, отправляемый на различные станции назначения или принадлежащий разным грузоотправителям, идущий по жесткой нитке графика (рис. 4).

Контейнерные шаттлы формируются:

- из контейнерного и block-train поездов с разными станциями назначения, с обязательным выделением ядра (контейнерного поезда) назначением на одну станцию;

- из нескольких block-train поездов с разными станциями назначения, которые следуют в попутном направлении до станции расформирования;

- на попутной станции следования с постановкой одного или нескольких block-train поездов в хвост контейнерного поезда.

Список попутных станций, на которых допустимо формирование шаттлов, устанавливается местными технологиями дороги в соответствии с местными особенностями.

В комплексе услуга будет содержать следующие сервисы:

- погрузка контейнеров на путях общего пользования;

- формирование контейнерных и block-train поездов на путях общего пользования;

- отправление контейнерного шаттла по согласованному времени отправления поездов (по расписанию);

- доведение block-train поездов до станций назначения в рамках услуги «Грузовой экспресс».

Реализация данной услуги на рынке железнодорожных перевозок позволит частично обезличить парк вагонов различных контейнерных операторов и разгрузить железнодорожные пункты пропуска.

Одной из основных особенностей и ключевым положительным эффектом при организации такой перевозки для клиентов будет предоставление перевозчиком тарифной отметки «05» на каждую часть шаттла, будь то ядро (контейнерный поезд) или прицепляемая часть (block-train поезд).

Главным условием такой перевозки является проследование шаттлом без переформирования расстояния не менее 1 500 км.

Для ОАО «РЖД» положительным эффектом будет возможность увеличения провозной способности участков без внедрения мероприятий по совершенствованию железнодорожной инфраструктуры. Для контейнерных операторов основным преимуществом станет возможность формирования контейнерного шаттла из нескольких операторов, что также позволит:

1. Сократить срок доставки груза. В первую очередь это относится к импортным контейнерным поездам, следующим через ЖДПП, такие как Забайкальск. Через ЖДПП Забайкальск отправляют свои грузы два ключевых контейнерных оператора: ПАО «Транс-контейнер» и АО «РЖД Бизнес Актив». В то же время маршруты контейнерных поездов зачастую совпадают, но существенные ограничения в условиях формирования маршрутных контейнерных поездов, приведенные ранее, не позволяют отправлять данные грузы в составе одного поезда с тарифной отметкой «05». В результате практически ежедневно на

станции стоят в накоплении поезда разных операторов на одно и то же направление в течение нескольких дней.

2. Привести в соответствие к перевозке более 20 % контейнерных маршрутов, оформление которых железнодорожным транспортом стало нецелесообразным при введении минимальной условной длины поезда в 71 вагон, а логистика груза перешла на перевозки альтернативным видом транспорта.

3. Увеличить пропускную и провозную способности участков за счет вождения полносоставных поездов длиной 71 усл. ваг., уменьшить вождение количества объединенных по-

ездов, но увеличить количество ниток поездов на графике за сутки.

Также были проведены дополнительные исследования по возможности тиражирования новых логистических подходов формирования и отправления контейнерных поездов на всей сети ОАО «РЖД». Для изысканий брались основные станции и терминалы, на которых формируются контейнерные отправки преимущественно маршрутными поездами. Предметом исследования были выбраны перевозки одного из ключевых контейнерных операторов за 2023 г. (табл. 3).

Таблица 3. Анализ отправления контейнерных поездов с ключевых станций их формирования на сети железных дорог Российской Федерации в 2023 г.

Table 3. Analysis of the departure of container trains from key stations of their formation on the road network of the Russian Federation in 2023

Станция отправления Departure station	Станция назначения Destination station	1 января – 30 ноября 2023 г.			1 – 31 декабря 2023 г.		
		Длина поезда, усл. ваг. Train length, conv. wagons	Количество отправленных поездов (и физических вагонов) Number of departed trains (and actual wagons)	Среднее время накопления на один состав, сут Average accumulation time per train, days	Длина поезда, усл. ваг. Train length, conventional wagons	Количество отправленных поездов (и физических вагонов) Number of dispatched trains (and actual wagons)	Среднее время накопления на один состав, сут Average accumulation time per train, days
Артем – Приморский 1	Автово Avtovo	57–71	1×31	6,2	71	0	9,6
	Белый Раст Belyi Rast	57–71	14×124		71	2×38	
	Ступино Stupino	57–71	2×31		71	0	
	Селятино Selyatino	57–71	1×31		71	0	
	Электроугли Elektrougli	57–71	5×31		71	0	
	Станции перегрузки (полувагонов) Transshipment stations (gondola wagons)	57–71	88×57		71	3×71	
Гродеково Grodosovo	Белый Раст Belyi Rast	57–71	5×31	9,7	71	0	10,5
	Жодино Zhodino	57–71	1×31		71	0	

	Купавна Kuravna	57–71	1×31		71	0	
	Селятино Selyatino	57–71	2×31		71	0	
	Тихоново Tikhonovo	57–71	3×31		71	0	
	Шушары Shushary	57–71	1×36		71	0	
	Электроугли Elektrougli	57–71	7×31		71	1×38	
	Станции перегрузки (полувагонов) Transshipment stations (gondola wagons)	57–71	6×55		71	0	
Сыктывкар Syktyvkar	Алтынколь Altynkol'	57–71	3×31	4,1	71	0	7,8
	Гродеково Grodekovo	57–71	1×38		71	0	
	Достык Dostyk	57–71	3×31		71	0	
	Забайкальск Zabaikal'sk	57–71	20×38		71	1×38	
		57–71	1×39		71	0	
		57–71	1×42		71	0	
Наушки Naushki	57–71	8×31	71	1×31			
Братск Bratsk	Гродеково Grodekovo	57–71	1×31	8,1	71	0	8,8
	Забайкальск Zabaikal'sk	57–71	5×31		71	1×38	
		57–71	1×32		71	0	
		57–71	1×38		71	0	
	Наушки Naushki	57–71	4×31		71	0	
Находка Восточная East Nakhodka	57–71	1×32	71	0			
Томск – Грузовой	Гродеково Grodekovo	57–71	2×31	6,4	71	0	8,5
	Жодино Zhodino	57–71	1×31		71	0	
	Забайкальск Zabaikal'sk	57–71	3×38		71	1×38	
	Наушки Naushki	57–71	4×31		71	0	
Базаиха Bazaikha	Гродеково Grodekovo	57–71	1×31	7,1	71	0	10,9
		57–71	1×38		71	0	
	Достык Dostyk	57–71	3×31		71	0	
	Забайкальск Zabaikal'sk	57–71	7×38		71	1×32	
		57–71	1×40		71	0	
	Наушки Naushki	57–71	7×31		71	0	

Заключение

Из представленных результатов (см. табл. 4) следует, что проблема формирования контейнерных поездов на ЖДПП ст. Забайкальск актуальна на всей сети ОАО «РЖД». С введением новых условий минимальной длины в октябре – ноябре 2023 г. существенно сократилось количество направлений, а, следовательно, и число сформированных составов маршрутных контейнерных поездов (более 40–50 %). Кроме того, практически по каждому оставшемуся маршруту существенно увеличилось среднее время накопления составов на терминалах или путях общего пользования (от 1 до 3,8 сут в зависимости от направления), что негативно сказывается на сроках доставки груза, а в некоторых случаях делает перевозки неэффективными и нецелесообразными [18].

На каждой из представленных в табл. 4 станций работает не один контейнерный оператор, и ситуация с формированием контейнерных поездов идентичная. При этом в большинстве случаев вагоны с контейнерами у разных контейнерных операторов стоят на одних и тех же станциях и терминалах в ожидании накопления

до установленной условной длины в один и тот же период времени и в итоге отправляются в разных поездах, при этом время накопления каждого составляет от 7 до 11 сут.

Применение контейнерного шаттла позволит:

- сократить время накопления контейнерных поездов на станциях формирования, что привело бы к сокращению сроков доставки грузов и освобождению инфраструктуры ОАО «РЖД», а также частных контейнерных терминалов;

- увеличить провозную и пропускную способности участков железных дорог ОАО «РЖД», в том числе и на лимитирующих направлениях за счет запуска поездов преимущественно длиной 71 усл. ваг. и сокращения количества объединенных поездов;

- привести в соответствие и сделать экономически целесообразными до 30–40 % контейнерных маршрутов, которые были переориентированы на альтернативные виды транспорта вследствие установления минимальной условной длины маршрутного контейнерного поезда в 71 вагон.

Список литературы

1. Басыров И.М., Кочнева Д.И., Чан Х. Инновационная технология терминальной переработки контейнеров // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 2 (54). С. 108–116.
2. Развитие комплексных транспортно-логистических услуг в обеспечении контейнерных перевозок на юге России / П.В. Куренков, И.А. Солоп, Е.А. Чеботарева и др. // Вестник транспорта Поволжья. 2022. № 3 (93). С. 46–55.
3. Назарова А.Н., Вирычева Е.В., Трейман М.Г. Обзор и прогнозирование развития рынка контейнерных перевозок // Управленческий учет. 2023. № 1. С. 341–347.
4. 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.
5. Чернышова А.В., Рустамова И.Т. Актуальные проблемы и развитие контейнерных перевозок на современном этапе // Инновационная экономика и современный менеджмент. 2023. № 1 (43). С. 46–48.
6. Гашкова Л.В., Морозова О.Ю. Современное состояние рынка международных контейнерных перевозок в России // Вестн. Алтайс. акад. экономики и права. 2022. № 9-1. С. 53–61.
7. Боцвин Д.В., Ковалев Г.А., Мамаев Э.А. Организация сборных контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2012. № 2 (46). С. 119–125.
8. Москвичев О.В. Модели, методы и алгоритмы оптимизации контейнерно-транспортной системы железнодорожного транспорта на основе кластерного подхода // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 18–27.
9. Перспектива контейнерных перевозок // Перевозка 24 : сайт. URL : <https://pervozka24.ru/pages/perspektiva-kontejnernyh-perevozok> (Дата обращения 16.04.2024).
10. Иванова Е. В. Контейнерные перевозки в условиях Российской Федерации // Молодой ученый. 2021. № 5 (347). С. 313–314. URL: <https://moluch.ru/archive/347/78246/> (дата обращения: 01.10.2024).
11. Проблемы и перспективы контейнерных перевозок // Морские вести России : сайт. URL : <https://morvesti.ru/analitika/1685/86587/> (Дата обращения 16.04.2024).
12. 12 фактов о том, как российская экономика переносит санкции // Т-Ж : сайт. URL : <https://journal.tinkoff.ru/short/sanction-facts/> (Дата обращения 16.04.2024).
13. Совершенствование организации доставки контейнеров / Д.С. Матюшин, А.В. Астафьев, Е.Н. Андрущак и др. // Вестник транспорта. 2018. № 12. С. 22–29.
14. РЖД удлинит контейнерные поезда // Infranews : сайт. URL : <https://www.infranews.ru/logistika/zheleznyadорога/63772-rzhd-udlinyaet-kontejnernye-poezda/> (Дата обращения 16.04.2024).
15. Литвинцев С.О., Кудрявцева М.В. Перспективы контейнеризации грузов в России в период глобального изменения логистических цепочек в мире // Наука 1520 ВНИИЖТ : Загляни за горизонт : сб. материалов II Междунар. конф. М., 2023. С. 153–158.

16. Перевозки контейнеров по сети РЖД за январь-февраль 2024 года выросли на 11% // Infranews : сайт. URL : <https://www.infranews.ru/logistika/zheleznaya-doroga/64536-perevozki-kontejnerov-po-seti-rzhd-za-yanvar-fevral-2024-goda-vyrosli-na-11> (Дата обращения 16.04.2024).
17. Гришкова Д.Ю., Тесленко И.О., Ольховиков С.Э. Организация ускоренных контейнерных поездов // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2023. № 2 (35). С. 48–55.
18. Литвинцев С.О., Боднар И.Н., Сорокина М.Н. Развитие контейнерных перевозок в период экономической дезадаптации // Актуальные проблемы железнодорожной науки глазами молодых исследователей : сб. материалов круглого стола, посвящ. Дню железнодорожника. М., 2022. С. 69–81.

References

1. Basyrov I.M., Kochneva D.I., Chan Kh. Innovatsionnaya tekhnologiya terminal'noi pererabotki konteynerov [Innovative technology for terminal processing of containers]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Urals State Transport University], 2022, no. 2 (54), pp. 108–116.
2. Kurenkov P.V., Solop I.A., Chebotareva E.A., Ivanov A.P. Razvitie kompleksnykh transportno-logisticheskikh uslug v obespechenii konteynernykh perevozk na yuge Rossii [Development of complex transport and logistics services in providing container transportation in the south of Russia]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region], 2022, no. 3 (93), pp. 46–55.
3. Nazarova A.N., Viryacheva E.V., Treiman M.G. Obzor i prognozirovanie razvitiya rynka konteynernykh perevozk [Review and forecasting of the development of the container transportation market]. *Upravlencheskii uchet* [Management accounting], 2023, no. 1, pp. 341–347.
4. Efimova E.N., Borodina V.A. Ekonomicheskie aspekty vzaimodeistviya transportno-logisticheskikh tsentrov i perevozhchika pri realizatsii konteynernykh perevozk [Economic aspects of interaction between transport and logistics centers and the carrier in the implementation of container transportation]. *Ekonomika zheleznikh dorog* [The economy of railways], 2022, no. 9, pp. 35–42.
5. Chernyshova A.V., Rustamova I.T. Aktual'nye problemy i razvitie konteynernykh perevozk na sovremennom etape [Current problems and development of container transportation at the present stage]. *Innovatsionnaya ekonomika i sovremennyy menedzhment* [Innovative economics and modern management], 2023, no. 1 (43), pp. 46–48.
6. Gashkova L.V., Morozova O.Yu. Sovremennoe sostoyanie rynka mezhdunarodnykh konteynernykh perevozk v Rossii [Current state of the international container transportation market in Russia]. *Vestnik Altayskoi akademii ekonomiki i prava* [Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law], 2022, no. 9-1, pp. 53–61.
7. Botsvin D.V., Kovalev G.A., Mamaev E.A. Organizatsiya sbornykh konteynernykh perevozk na zheleznodorozhnom transporte [Organization of prefabricated container transportation on railway transport]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2012, no. 2 (46), pp. 119–125.
8. Moskvichev O.V. Modeli, metody i algoritmy optimizatsii konteynerno-transportnoi sistemy zheleznodorozhnogo transporta na osnove klaster'nogo podkhoda [Models, methods and algorithms for optimizing the container transport system of railway transport based on the cluster approach]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2017, no. 2 (53), pp. 18–27.
9. Perspektiva konteynernykh perevozk (elektronnyi resurs) [The perspective of container transportation (electronic resource)]. Available at: <https://perevozka24.ru/pages/perspektiva-konteynernykh-perevozk> (Accessed April 16, 2024).
10. Ivanova E.V. Konteynernye perevozki v usloviyakh Rossiiskoi Federatsii [Container transportation in the Russian Federation]. *Molodoi uchenyi* [Young scientist], 2021, no. 5 (347), pp. 313–314.
11. Problemy i perspektivy konteynernykh perevozk (elektronnyi resurs) [Problems and prospects of container transportation (electronic resource)]. Available at: <https://morvesti.ru/analitika/1685/86587/> (Accessed April 16, 2024).
12. 12 faktov o tom, kak rossiiskaya ekonomika perenosit sanktsii (elektronnyi resurs) [12 facts about how the Russian economy tolerates sanctions (electronic resource)]. Available at: <https://journal.tinkoff.ru/short/sanction-facts/> (Accessed April 16, 2024).
13. Matyushin D.S., Astaf'ev A.V., Andrushchak E.N., Kizimirov M.V. Sovershenstvovanie organizatsii dostavki konteynerov [Improving the organization of container delivery]. *Vestnik transporta* [Transport Bulletin], 2018, no. 12, pp. 22–29.
14. RZhD удлиняет контейнерные поезда (elektronnyi resurs) [Russian Railways lengthens container trains (Electronic resource)]. Available at: <https://www.infranews.ru/logistika/zheleznaya-doroga/63772-rzhd-udlinyaet-konteynernye-poezda/> (Accessed April 16, 2024).
15. Litvintsev S.O., Kudryavtseva M.V. Perspektivy konteynerizatsii gruzov v Rossii v period global'nogo izmeneniya logisticheskikh tsepochek v mire [Prospects of cargo containerization in Russia during the global change in logistics chains in the world]. *Sbornik materialov II Mezhdunarodnoi konferentsii «Nauka 1520 VNIIZhT: Zaglyani za gorizont»* [Proceedings of the II International Conference «Nauka 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon»]. Moscow, 2023, pp. 153–158.
16. Perevozki konteynerov po seti RZhD za yanvar'-fevral' 2024 goda vyrosli na 11% (elektronnyi resurs) [Container transportation via the Russian Railways network increased by 11% in January-February 2024 (electronic resource)]. Available at: <https://www.infranews.ru/logistika/zheleznaya-doroga/64536-perevozki-kontejnerov-po-seti-rzhd-za-yanvar-fevral-2024-goda-vyrosli-na-11/> (Accessed April 16, 2024).
17. Grishkova D.Yu., Teslenko I.O., Olkhovikov S.E. Organizatsiya uskorennykh konteynernykh poezdov [Organization of accelerated container trains]. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona* [Transport of the Asia-Pacific Region], 2023, no. 2 (35), pp. 48–55.
18. Litvintsev S.O., Bodnar I.N., Sorokina M.N. Razvitie konteynernykh perevozk v period ekonomicheskoi dezadaptatsii [Development of container transportation during the period of economic disadaptation]. *Sbornik materialov kruglogo stola, posvyashchennogo Dnyu zheleznodorozhnika «Aktual'nye problemy zheleznodorozhnoi nauki glazami molodykh issledovatelei»* [Proceedings from the round table dedicated to the Railway Worker's Day «Actual problems of railway science through the eyes of young researchers»]. Moscow, 2022, pp. 69–81.

Информация об авторах

Литвинцев Сергей Олегович, технический эксперт Научного центра цифровых моделей перевозок и технологий энергосбережения, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), г. Москва; e-mail: litvintsev.sergey@vniizht.ru.

Лобыцин Игорь Олегович, ведущий инженер Научного центра цифровых моделей перевозок и технологий энергосбережения, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), г. Москва; e-mail: Lobytsin.Igor@vniizht.ru.

Кудрявцева Мария Владимировна, технический эксперт Научного центра цифровых моделей перевозок и технологий энергосбережения, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), г. Москва; e-mail: kudryavtseva.mariya@vniizht.ru.

Богуславская Наталья Михайловна, инженер 1 категории Научного центра цифровых моделей перевозок и технологий энергосбережения, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), г. Москва; e-mail: boguslavskaya.n@vniizht.ru.

Information about the authors

Sergei O. Litvintsev, Technical Expert of the Scientific Center for Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies, Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT), Moscow; e-mail: litvintsev.sergey@vniizht.ru.

Igor' O. Lobytsin, Leading Engineer of the Scientific Center for Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies, Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT), Moscow; e-mail: Lobytsin.Igor@vniizht.ru.

Mariya V. Kudryavtseva, Technical Expert of the Scientific Center for Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies, Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT), Moscow; e-mail: kudryavtseva.mariya@vniizht.ru.

Natal'ya M. Boguslavskaya, Engineer 1st category of the Scientific Center for Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies, Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT), Moscow; e-mail: boguslavskaya.n@vniizht.ru.

Применение кабельных линий электропередачи в системах внешнего электроснабжения железных дорог постоянного тока

А.В. Крюков^{1,2}, А.В. Черепанов¹✉, Нгуен Куок Хиеу²

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

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉smart_grid@mail.ru

Резюме

Для присоединения тяговых подстанций железных дорог к высоковольтным сетям электроэнергетических систем применяются воздушные линии электропередачи. Такой подход имеет целый ряд недостатков, к которым относятся значительная ширина охранной зоны, возможность повреждений при сильных ветрах и образовании гололедно-изморозевых отложений, риск поражения людей и животных от воздействия шаговых напряжений из-за обрыва проводов. Указанные негативные эффекты можно исключить при использовании для подключения тяговых подстанций кабельных линий 110 кВ с изоляцией из шитого полиэтилена. В статье представлены результаты исследований по разработке цифровых моделей для определения режимов систем тягового электроснабжения постоянного тока с питанием преобразовательных подстанций по кабельным линиям. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: при использовании кабельных линий минимальные трехминутные напряжения повышаются на 2,0–3,5%; потери активной мощности в головной питающей линии уменьшаются на 8–14%. Тяговые подстанции постоянного тока не создают в примыкающих сетях заметного уровня несимметрии. Однако любая разбалансированность трехфазной системы оказывает негативное влияние на электроприемники, особенно на широко распространенные асинхронные электродвигатели. Применение кабелей из шитого полиэтилена позволяет снизить коэффициенты несимметрии в 11–22 раза. При наличии воздушных линий уровни гармонических искажений на шинах 110 кВ тяговых подстанций 2 и 3 превышают нормально допустимые значения. Замена воздушной линии на кабельную дает возможность уменьшить эти показатели примерно на 60%. Коэффициенты отдельных гармоник снижаются на 37–100%. Разработанные цифровые модели могут использоваться при проектировании и эксплуатации систем тягового электроснабжения постоянного тока. Методика определения режимов является универсальной и подойдет для расчета систем внешнего электроснабжения любой конфигурации и тяговых сетей различного конструктивного исполнения.

Ключевые слова

тяговое электроснабжение, постоянный ток, кабельные линии, шитый полиэтилен, моделирование, качество электроэнергии

Для цитирования

Крюков А.В. Применение кабельных линий электропередачи в системах внешнего электроснабжения железных дорог постоянного тока / А.В. Крюков, А.В. Черепанов, Нгуен Куок Хиеу // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 67–77. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).67-77.

Информация о статье

поступила в редакцию: 27.06.2024 г.; поступила после рецензирования: 06.09.2024 г.; принята к публикации: 09.09.2024 г.

Application of cable lines in external power supply systems of DC railways

A.V. Kryukov^{1,2}, A.V. Cherepanov¹✉, Nguyen Quoc Hieu¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉smart_grid@mail.ru

Abstract

To connect railway traction substations to high-voltage networks of electrical power systems, overhead power lines are used. This approach has a number of disadvantages, which include the following: significant width of the security zone; the possibility of damage due to strong winds and the formation of ice and frost deposits; risk of injury to people and animals from the effects of step voltages due to broken wires. These negative effects can be eliminated by using 110 kV cable lines with molecular cross-linked polyethylene insulation to connect traction substations. The purpose of the research presented in the article was to develop digital models for determining the modes of DC traction power supply systems with power supply to traction substations via cable power lines. The results obtained allowed us to draw the following conclusions: when using cables, the minimum three-minute voltages increase by 2,0–3,5%; active power losses in the head power transmission line are reduced by 8–14%. DC traction substations do not create noticeable levels of asymmetry in adjacent networks. However, any asymmetry of the three-phase

system has a negative impact on electrical consumers, especially on the widespread asynchronous electric motors. The use of XLPE cables allows to reduce the asymmetry coefficients by 11–22 times. In the presence of overhead power lines, the levels of harmonic distortion on the 110 kV buses of TP 2 and TP 3 exceed the normally permissible values. Replacing an overhead line with a cable makes it possible to reduce the total coefficients characterizing the levels of harmonic distortion by approximately 60 %. The coefficients of individual harmonics are reduced by 37–100 %. The developed digital models can be used in the design and operation of traction power supply systems. The method for determining modes is universal and can be used to calculate the modes of external power supply systems of any configuration and traction networks of various designs.

Keywords

traction power supply, direct current, cable lines, cross-linked polyethylene, modeling, power quality

For citation

Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Nguyen Quoc Hieu. Primenenie kabel'nyh linii elektroperedachi v sistemakh vneshnego elektrosnabzheniya zheleznih dorog postoyannogo toka [Application of cable power lines in external power supply systems of DC railways]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 67–77. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).67-77.

Article info

Received: June 27, 2024; Revised: September 6, 2024; Accepted: September 9, 2024.

Введение

Для присоединения тяговых подстанций (ТП) железных дорог к сетям 110–220 кВ традиционно используются воздушные линии (ВЛ) электропередачи, что имеет определенные недостатки:

- значительная площадь охранной зоны;
- повреждения при сильных ветрах и образовании гололедно-изморозевых отложений;
- риск поражения людей и животных шаговыми напряжениями при обрыве проводов.

Перечисленные негативные эффекты можно исключить при использовании в системах внешнего электроснабжения ТП кабелей 110–220 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Кабельные линии (КЛ) отличаются от ВЛ малой площадью охранных зон, защищенностью от воздействия сильных ветров и гололеда, меньшим риском нанесения электроtraum, повышенной емкостью с компенсацией индуктивных нагрузок и др. В ряде случаев, несмотря на высокую стоимость, КЛ могут оказаться предпочтительнее ВЛ.

Задачам определения режимов систем тягового электроснабжения постоянного тока (СТЭ ПТ) посвящено много работ, что свидетельствует об их актуальности. Например, алгоритмы моделирования электрического влияния тяговых сетей (ТС) ПТ напряжением 24 кВ на смежные линии представлены в [1]; способ учета проводимости земли при определении режимов СТЭ ПТ описан в [2]; особенности расчета ТС рассмотрены в [3]; проблема повышения энергетической эффективности СТЭ путем использования накопителей, размещенных

на постах секционирования решена в [4]; метод оценки магнитного влияния ТС ПТ напряжением 3 и 24 кВ на смежные коммуникации связи представлен в [5]; результаты анализа неисправностей на основе моделирования СТЭ ПТ метрополитена в различных условиях работы приведены в [6]; исследование характеристик СТЭ ПТ в режимах коротких замыканий выполнено в [7]; алгоритм определения эквивалентной нагрузки СТЭ реализован в [8]; преобразователь переменного тока в постоянный, применимый в СТЭ ПТ и предназначенный для высокоскоростных поездов представлен в [9]; результаты моделирования динамического распределения тока замыкания на землю в СТЭ ПТ приведены в [10]; оценка надежности и ресурса СТЭ ПТ с учетом нагрузочных характеристик дана в [11]; новая СТЭ ПТ описана в [12]; исследование влияния СТЭ ПТ метрополитена на гармоники электросети проведено в [13], способ повышения эффективности работы защиты фидера в СТЭ ПТ предложен в [14]; структурная схема и стратегия управления усовершенствованной СТЭ ПТ рассмотрены в [15]; комплексная стратегия улучшения качества электроэнергии для СТЭ разработана в [16], вопросы моделирования СТЭ ПТ для высокоскоростного железнодорожного транспорта изучены в [17]; результаты исследования новой СТЭ для комплексного повышения качества электроэнергии представлены в [18]; вероятностный способ расчета тяговой нагрузки метрополитена на основе метода Монте-Карло предложен в [19]; аппаратный эмулятор СТЭ ПТ для определения потенциала рельсов описан в [20]; задача

моделирования нового гибридного трансформатора для СТЭ метрополитена решена в [21].

Цель представленных в статье исследований состояла в разработке цифровых моделей для определения режимов СТЭ ПТ с питанием преобразовательных подстанций по КЛ.

Методы моделирования

Представленный анализ публикаций дает возможность сделать вывод, что многие важные аспекты, связанные с моделированием СТЭ ПТ, уже в них рассмотрены. Однако задача определения режимов СТЭ ПТ, имеющих в своем составе КЛ с изоляцией из СПЭ остается нерешенной. СТЭ обладают рядом особенностей, существенно отличающих их от электрических сетей общего назначения. К ним можно отнести: резкопеременную и нелинейную тяговую нагрузку; структурную разнородность подсистем, вызванную тем, что в СТЭ ПТ входят однофазные ТС постоянного тока и трехфазное внешнее электроснабжение; значительную пространственную распределенность; перемещение потребителей электроэнергии (электропоездов) [22]. Перечисленные факторы затрудняют моделирование режимов СТЭ ПТ, характеризующихся значительными гармоническими искажениями. Для решения этой задачи, имеющей важное значение для теории и практики, можно использовать методы,

алгоритмы и программный комплекс (ПК) Fazonord, описанные в [22–26].

Применяемый для моделирования метод фиксированных ЭДС подробно описан в работе [22]. Расчеты режимов СТЭ ПТ проводились с использованием методов диакоптики, при этом ЭДС и их внутренние сопротивления предполагались фиксированными и определялись параметрами холостого хода преобразователя.

Результаты моделирования

Определение режимов СТЭ проводилось в промышленном ПК Fazonord. В текущей версии данного ПК за номером 5.3.5.0–2024 реализована технология моделирования сетей ПТ, подробно описанная в [23]. Ниже представлены результаты расчетов для системы электроснабжения участка дороги ПТ, схема которой показана на рис. 1. В состав СТЭ входили три подстанции и две межподстанционные зоны длиной 20 км. Моделирование осуществлялось для двух вариантов, отличающихся исполнением внешней сети. В первом рассматривались линии, реализованные на основе СПЭ-кабелей, а втором – ВЛ.

Определялись режимы, возникающие при движении поездов массой 3 884 т (рис. 2 и 3). Координаты расположения токоведущих частей показаны на рис. 4.

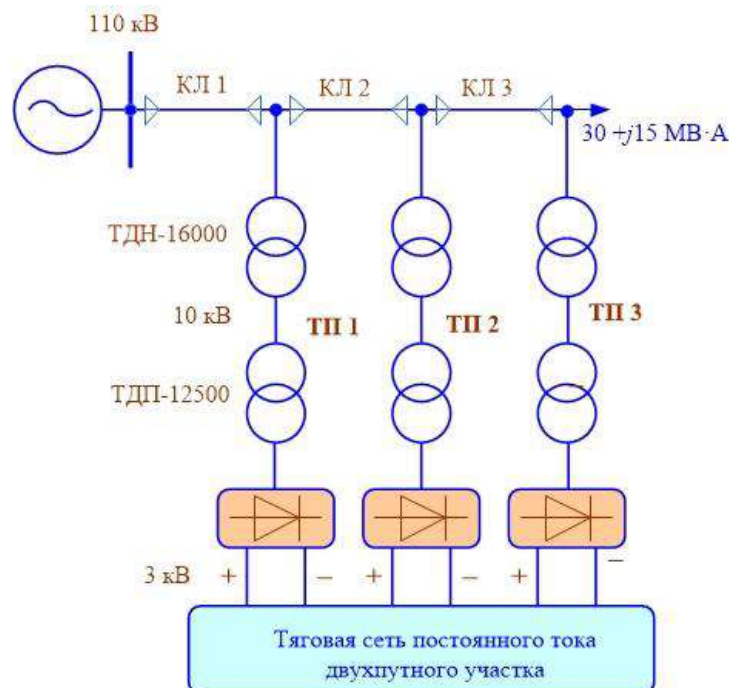


Рис. 1. Схема системы тягового электроснабжения

Fig. 1. Traction power supply system diagram (КЛ-cable line, ТП-traction substation)

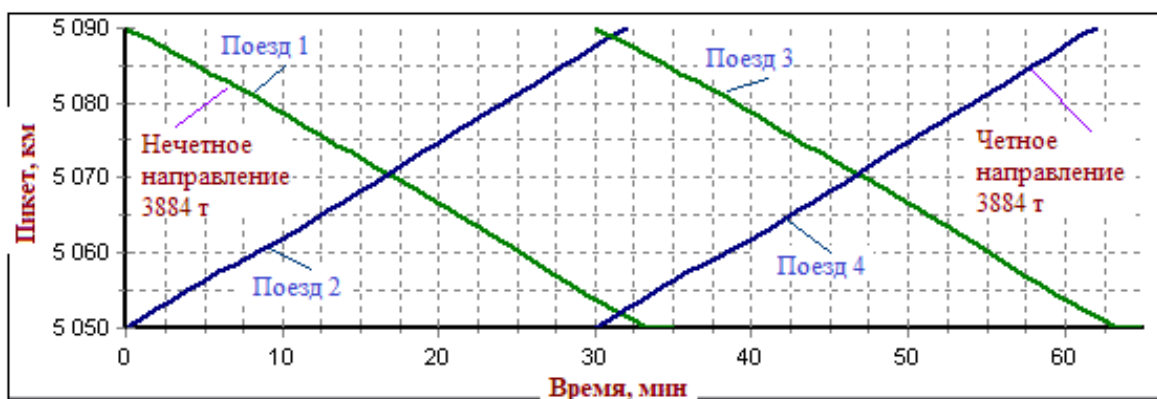
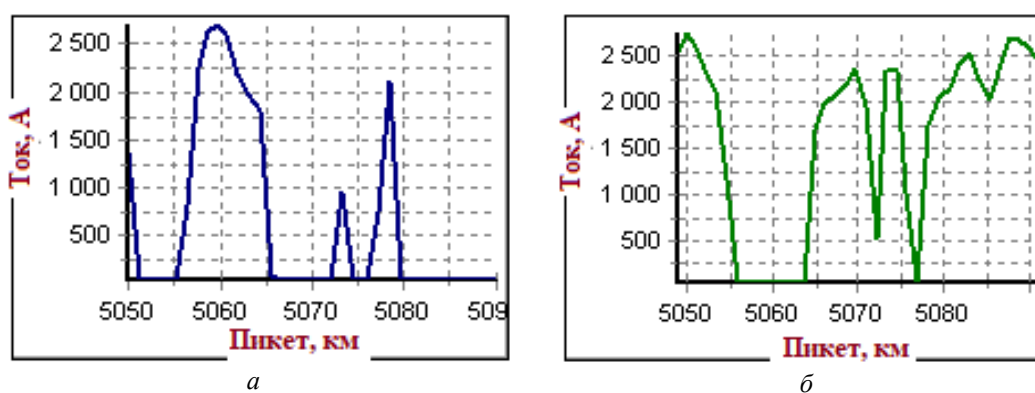


Рис. 2. График движения

Fig. 2. Schedule



а

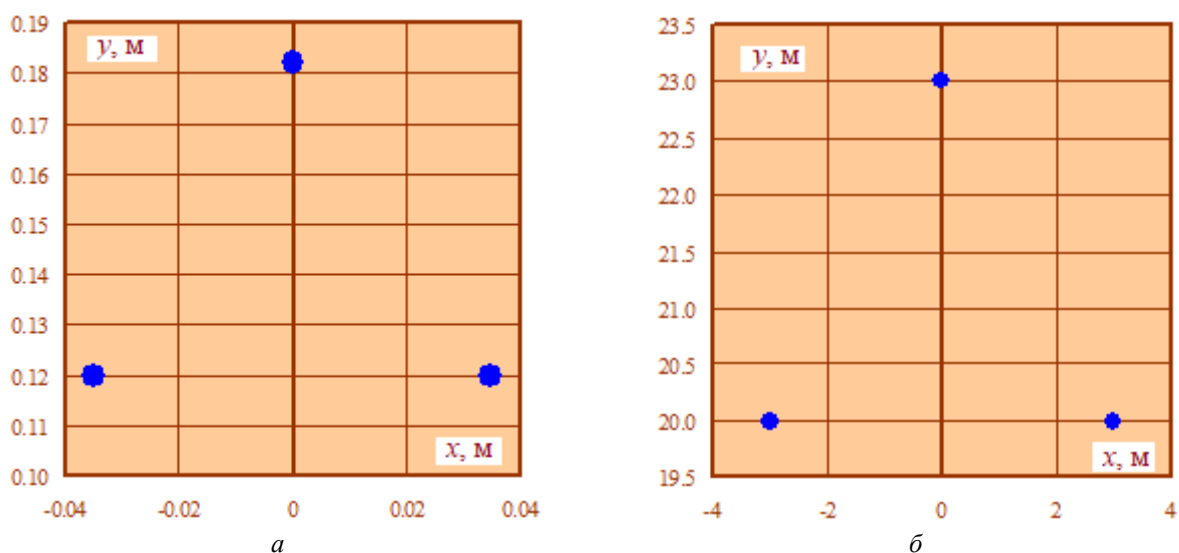
б

Рис. 3. Токи электровозов:

а – четное направление; б – нечетное направление

Fig. 3. Electric locomotive currents:

а – even direction; б – odd direction



а

б

Рис. 4. Координаты токоведущих частей:

а – центры кабелей; б – провода воздушной линии

Fig. 4. Coordinates of current-carrying parts:

а – cable centers; б – overhead line wires

Результаты моделирования представлены в табл. и на рис. 5–14. На рис. 5 и 6 и в табл. приведены данные, характеризующие уровни напряжений U на токоприемниках электровазов. Из них видно, что при использовании КЛ минимальные трехминутные напряжения повышаются на 2,0–3,5 %, наблюдается стабилизация этих параметров. Так, среднеквадратиче-

ское отклонение U для первого нечетного поезда снижается на 7 %. На рис. 7–9 показаны графики, характеризующие энергоэффективность внешней сети СТЭ. Из них видно, что потери мощности в головной питающей линии электрической передачи уменьшаются при использовании КЛ на 8–14 %.

Минимальные трехминутные напряжения на токоприемниках, кВ
Minimum three-minute voltages on current collectors, kV

Тип линии электрической передачи Type of power transmission line	Номер электровазова Electric locomotive number			
	1	2	3	4
Кабельная Cable	3	2,85	3	2,85
Воздушная Overhead	2,9	2,79	2,9	2,79

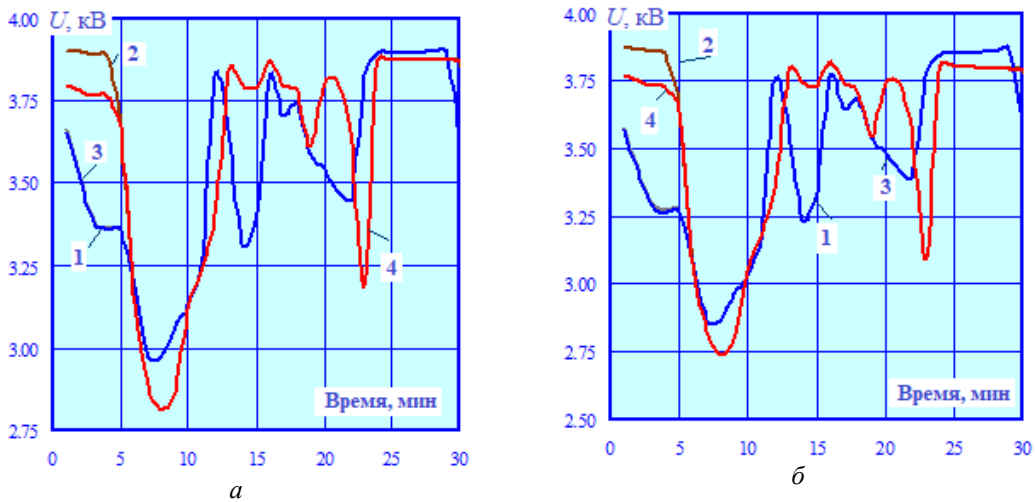


Рис. 5. Напряжения на пантографах электровазов:
а – кабельная линия; б – воздушная линия
Fig. 5. Voltages on electric locomotive pantographs:
а – cable line; б – overhead line

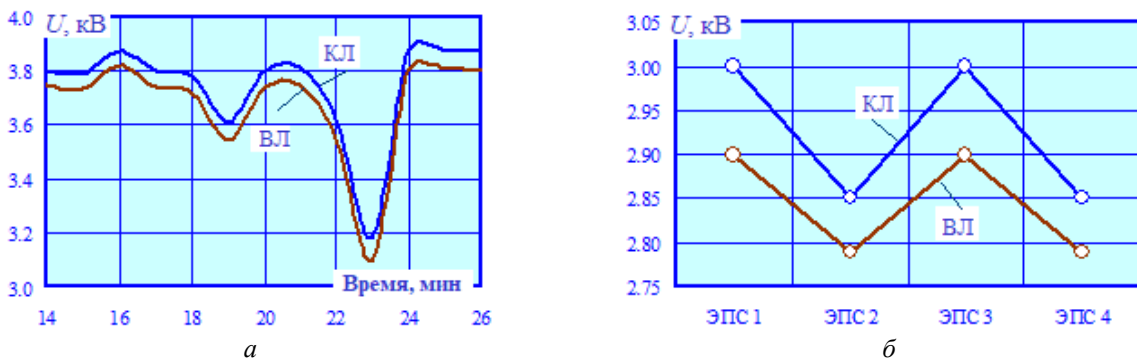


Рис. 6. Сравнение кабельной и воздушной линий:
а – изменения напряжений электровазова 2; б – минимальные трехминутные напряжения
Fig. 6. Comparison of cable and overhead lines:
а – voltage changes of electric locomotive 2; б – minimum three-minute voltages

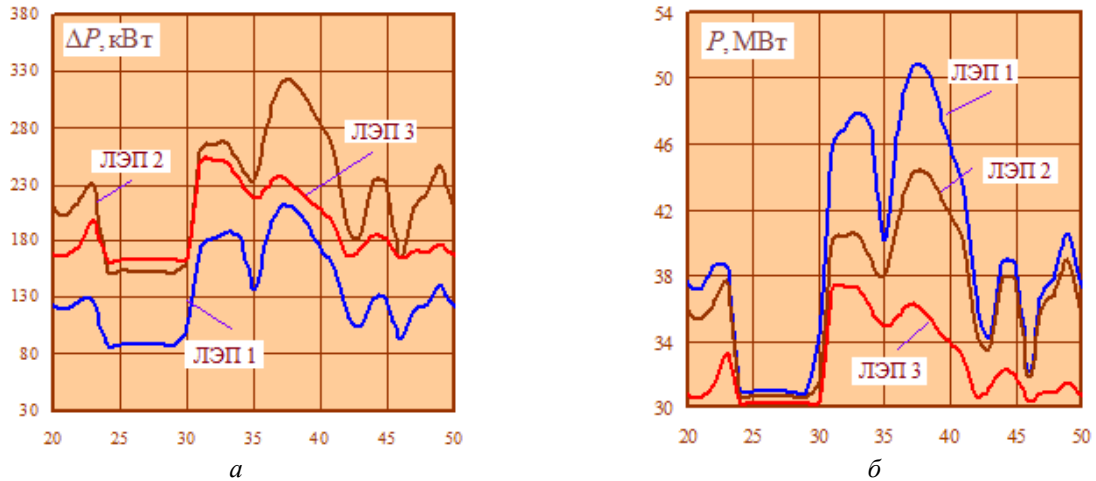


Рис. 7. Потери (а) и потоки (б) мощности в схеме с кабельной линией
Fig. 7. Losses (a) and flows (б) of power in a circuit with a cable line (ЛЭП-power transmission line)

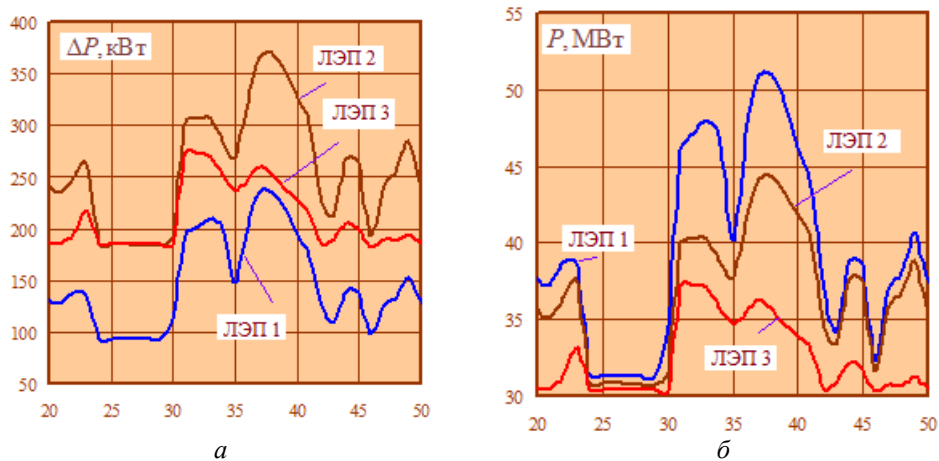


Рис. 8. Потери (а) и потоки (б) мощности в схеме с воздушной линией
Fig. 8. Losses (a) and flows (б) of power in an overhead line circuit

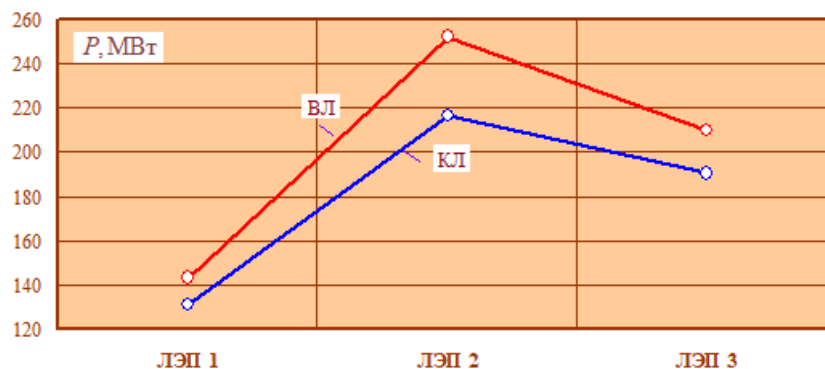


Рис. 9. Сравнение потерь мощности в линиях электрических передач
Fig. 9. Comparison of power losses in electrical transmission lines

ТП ПТ не создают в примыкающих сетях заметного уровня несимметрии. Однако любая несбалансированность трехфазной системы

оказывает негативное влияние на электроприемники, особенно на широко распространенные асинхронные электродвигатели. При использо-

вании СПЭ-кабелей уровни несимметрии снижаются в 11–22 раза (рис. 10).

На рис. 11–13 представлены результаты определения несинусоидальных режимов, создаваемых преобразовательными агрегатами ТП. Из них видно, что при наличии ВЛ уровни

гармонических искажений на шинах 110 кВ ТП 2 и ТП 3 превышают нормально допустимые значения. При замене ВЛ на КЛ суммарные коэффициенты высших гармоник (ВГ) уменьшаются на 60 %. Показатели $k_{U(n)}$ для отдельных ВГ снижаются на 37–100 % (рис. 13).

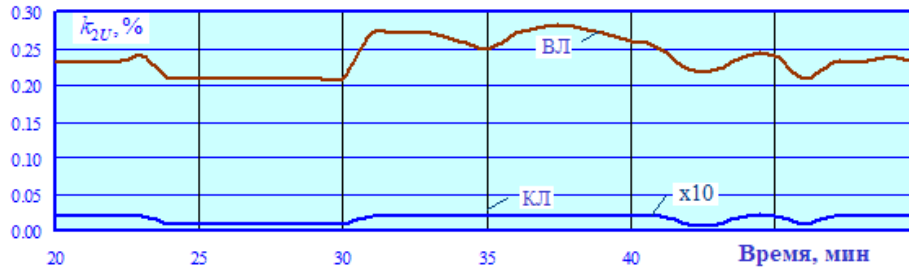


Рис. 10. Несимметрия на шинах 110 кВ ТП 3

(для наглядности значения k_{2U} для кабельной линии увеличены в 10 раз)

Fig. 10. Asymmetry on 110 kV buses TP 3

(for clarity, the k_{2U} values for the cable line are increased by 10 times)

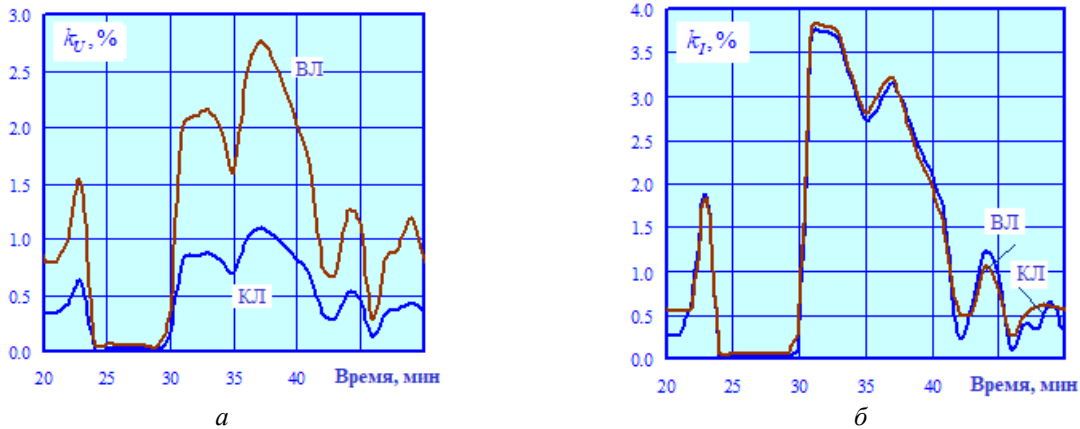


Рис. 11. Коэффициенты гармоник напряжения (а) и тока (б) на шинах 110 кВ ТП 3 (фаза А)

Fig. 11. Voltage (a) and current (b) harmonic coefficients on 110 kV buses of TP 3 (phase A)

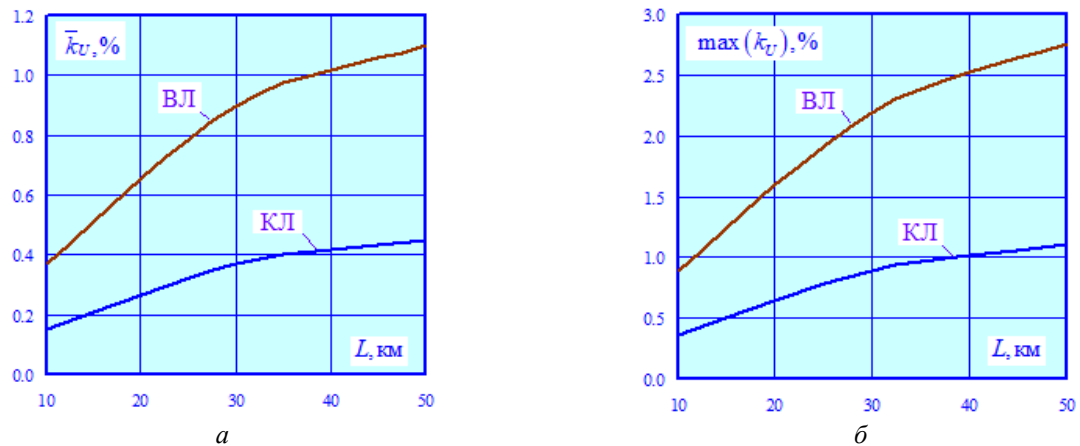


Рис. 12. Коэффициенты гармоник напряжения на шинах 110 кВ тяговых подстанций (фаза А):

а – средние значения; б – максимумы

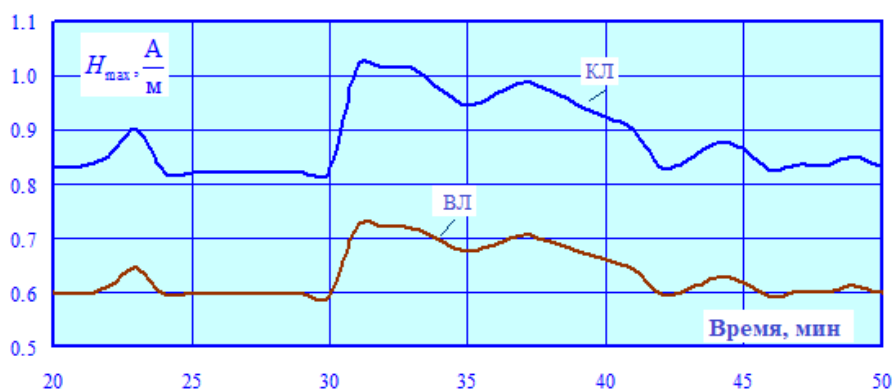
Fig. 12. Voltage harmonic distortion coefficients on 110 kV traction substation buses (phase A):

а – average values; б – maximums



Рис. 13. Спектры гармоник напряжения на шинах 110 кВ ТП 3

Fig. 13. Harmonic spectra of voltage on 110 kV buses of TP 3

Рис. 14. Амплитуды напряженностей магнитного поля по оси линии электрической передачи на высоте 1,8 м
Fig. 14. Amplitudes of magnetic field strengths along the axis of an electric transmission line at a height of 1,8 m

На рис. 14 приведены результаты определения напряженностей магнитного поля по оси железной дороги на высоте 1,8 м. Из него видно, что максимальные значения амплитуд H_{\max} не превышают допустимых значений для рассмотренных вариантов расчета. Однако при КЛ максимальная величина H_{\max} на 28 % выше аналогичного показателя, отвечающего ВЛ.

Заключение

Применение СПЭ-кабелей в системах внешнего электроснабжения железных дорог ПТ позволяет получить следующие положительные результаты:

- значительно уменьшить ширину охранной зоны;
- избежать повреждений при сильных ветрах и образовании гололедно-изморозевых отложений;

– снизить риск поражения людей и животных от воздействия шаговых потенциалов при обрыве проводов.

Результаты моделирования показали, что при использовании КЛ минимальные трехминутные напряжения повышаются на 2,0–3,5 %, потери активной мощности в головной питающей линии электрической передачи уменьшаются на 8–14 %, а коэффициенты несимметрии – в 11–22 раза. Замена ВЛ на КЛ дает возможность ослабить гармонические искажения на шинах 110 кВ ТП примерно на 60 %.

Разработанные цифровые модели могут применяться при проектировании и эксплуатации СТЭ ПТ. Методика определения режимов является универсальной и подойдет для расчетов систем внешнего электроснабжения любой конфигурации и ТС различного конструктивного исполнения.

Список литературы

1. Математическое моделирование электрического влияния тяговой сети постоянного тока напряжением 24 кВ на смежные линии / А.Н. Марикин, Е.С. Мушков, М.А. Иванов и др. // Электротехника. 2019. № 10. С. 23–26.
2. Лесников Д.В. Моделирование тяговой сети постоянного тока с учетом проводимости земли // Транспорт Урала. 2020. № 2 (65). С. 75–79.

3. Гаврилин И.С., Ершов С.В. Особенности моделирования и расчета тяговых сетей постоянного тока // Изв. Тульск. гос. ун-та. Техн. науки. 2012. № 12-3. С. 234–242.
4. Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 10. С. 54–64.
5. Математическое моделирование магнитного влияния контактной сети постоянного тока напряжением 3 и 24 кВ на смежные коммуникации связи / Е.С. Мушков, А.Н. Марикин, М.А. Иванов и др. // Транспорт Урала. 2021. № 2 (69). С. 97–100.
6. Luo J. Fault Analysis and Simulation of Metro DC Traction Power Supply System under Multiple Working Conditions // IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA). Dalian, 2022. P. 92–95. DOI 10.1109/AEECA55500.2022.9918840.
7. Research on Short-Circuit Characteristics of Subway DC Traction Power Supply System / M. Xia, Y. Zhou, Y. Huang et al. // IECON : the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Singapore, 2020. P. 3456–3460. DOI 10.1109/IECON43393.2020.9254651.
8. Lu C., Li X., Chen S. Composite Load Equivalent Modeling of Traction Power Supply System // 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). Chengdu, 2021. P. 32–40. DOI 10.1109/AEEES51875.2021.9403048.
9. AC/DC Converter for DC Traction Power Supply System with High-Speed Train Operation / Y. Sokol, V. Sychenko, Y. Voitovych et al. // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). Kyiv, 2019. P. 116–121. DOI 10.1109/ESS.2019.8764207.
10. Simulation Study on Dynamic Distribution of Ground Fault Current in Low and Medium Speed Magnetic Levitation Traction Power Supply System / N. Yan, J. Wang, A. Ping et al. // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE). Chongqing, 2022. DOI 10.1109/ICHVE53725.2022.9961483.
11. Reliability and Life Evaluation of a DC Traction Power Supply System Considering Load Characteristics / Y. Chen, Z. Tian, C. Roberts et al. // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2021. Vol. 7. Iss. 3. P. 958–968.
12. Modelling and Simulation of New Traction Power Supply System in Electrified Railway / M. Chen, T. Wen, W. Jiang et al. // IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Las Palmas, 2015. P. 1345–1350. DOI 10.1109/ITSC.2015.221.
13. Research on the influence of urban metro traction power supply system on power grid harmonics / H. Aoyang, Y. Litao, W. Li et al. // First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS). Harbin, 2017. DOI 10.1109/EIIS.2017.8298567.
14. An Improvement Method of Feeder Protection in DC Traction Power Supply System / W. Wei, C. Yueliang, W. Chuanxiu et al. // IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chengdu, 2019. P. 1588–1594. DOI 10.1109/IAEAC47372.2019.8997569.
15. Kang D., Xu J., He X. Structure Scheme and Control Strategy Design of Advanced Traction Power Supply System // IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Chengdu, 2022. P. 69–74. DOI 10.1109/ICIEA54703.2022.10006325.
16. Song H., Zeng L., He X. Power Quality Comprehensive Compensation Strategy for Retrofit Structure of Advanced Traction Power Supply System // IECON : 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Singapore, 2023. DOI 10.1109/IECON51785.2023.10312296.
17. Simiyu P., Davidson I.E. Modeling and Simulation of MVDC Traction Power System for High-Speed Rail Transportation // IEEE PES/IAS PowerAfrica. Nairobi, 2021. DOI 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543274.
18. Study on new traction power supply system for power quality comprehensive compensation in electrified railway / M. Chen, J. Luo, W. Jiang et al. // TENCON : IEEE Region 10 Conference. Macao, 2015. DOI 10.1109/TENCON.2015.7372869.
19. Probabilistic power flow calculation method for subway traction load based on quasi-Monte Carlo and semi-invariant method / J. Chang, Ch. Da, H. Guo et al. // 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA). Hefei, 2020. P. 586–591. DOI 10.1109/IFEEA51475.2020.00126.
20. DC Traction System Hardware Emulator for Rail Potential Distribution in DCAT Traction Power Supply System / L. Wang, X. Yang, J. Xu et al. // IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). Shenzhen, 2018. DOI 10.1109/PEAC.2018.8590497.
21. Modeling and Simulation of a New Hybrid Transformer for Metro Traction Power Supply System / C. Wang, Y. Huang, F. Hou et al. // IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Nangjing, 2022. P. 3350–3355. DOI 10.1109/CIEEC54735.2022.9846385.
22. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : ИрГУПС, 2005. 273 с.
23. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М. : Директ-Медиа, 2023. 156 с.
24. Моделирование режимов электрических сетей, питающих тяговые подстанции постоянного тока / А.В. Крюков, К.В. Суслов, А.В. Черепанов и др. // Энергетик. 2024. № 2. С. 9–13.
25. Крюков А.В., Суслов К.В., Нгуен К.Х. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных установками инверторной генерации // Интеллектуальная электротехника. 2024. № 1 (25). С. 70–85.
26. Уменьшение гармонических искажений в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог постоянного тока / А.В. Крюков, К.В. Суслов, А.В. Черепанов и др. // Промышленная энергетика. 2024. № 4. С. 51–57.

References

1. Marikin A.N., Mushkov E.S., Ivanov M.A., Agunov V.V., Ivanov I.A. Matematicheskoe modelirovaniye elektricheskogo vliyaniya tyagovoi seti postoyannogo toka napryazheniem 24 kV na smezhnye linii [Mathematical modeling of the electrical influence of a 24 kV DC traction network on adjacent lines]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2019, no. 10, pp. 23–26.
2. Lesnikov D.V. Modelirovaniye tyagovoi seti postoyannogo toka s uchedom provodimosti zemli [Modeling of a DC traction network taking into account the conductivity of the ground]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2020, no. 2 (65), pp. 75–79.
3. Gavrilin I.S., Ershov S.V. Osobennosti modelirovaniya i rascheta tyagovykh setei postoyannogo toka [Features of modeling and calculation of DC traction networks]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletins of the Tula State University. Technical sciences], 2012, no. 12-3, pp. 234–242.
4. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Povyseniye energeticheskoi effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya v usloviyakh raboty postov sektionirovaniya s nakopitelnyami elektricheskoi energii [Increasing the energy efficiency of the traction power supply system in the conditions of operation of sectioning posts with electrical energy storage devices]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering], 2015, vol. 326, no. 10, pp. 54–64.
5. Mushkov E.S., Marikin A.N., Ivanov M.A., Agunov V.V. Matematicheskoe modelirovaniye magnitnogo vliyaniya kontaktnoi seti postoyannogo toka napryazheniem 3 i 24 kV na smezhnye kommunikatsii svyazi [Mathematical modeling of the magnetic influence of a direct current contact network with voltages of 3 and 24 kV on adjacent communication lines]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2021, no. 2 (69), pp. 97–100.
6. Luo J. Fault Analysis and Simulation of Metro DC Traction Power Supply System under Multiple Working Conditions. *2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*. Dalian, 2022, pp. 92–95. DOI: 10.1109/AEECA55500.2022.9918840.
7. Xia M., Zhou Y., Huang Y., Yang H., Tai Y. Research on Short-Circuit Characteristics of Subway DC Traction Power Supply System. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Singapore, 2020, pp. 3456–3460. DOI 10.1109/IECON43393.2020.9254651.
8. Lu C., Li X., Chen S. Composite Load Equivalent Modeling of Traction Power Supply System. *2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)*. Chengdu, 2021, pp. 32–40. DOI 10.1109/AEEES51875.2021.9403048.
9. Sokol Y., Sychenko V., Voitovych Y., Kosariev Y., Styslo B., Hubskeyi P. AC/DC Converter for DC Traction Power Supply System with High-Speed Train Operation. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, 2019, pp. 116–121. DOI 10.1109/ESS.2019.8764207.
10. Yan N., Wang J., Ping A., Liu R., Xiao R., Yan H. Simulation Study on Dynamic Distribution of Ground Fault Current in Low and Medium Speed Magnetic Levitation Traction Power Supply System. *2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE)*. Chongqing, 2022. DOI 10.1109/ICHVE53725.2022.9961483.
11. Chen Y., Tian Z., Roberts C., Hillmansen S., Chen M. Reliability and Life Evaluation of a DC Traction Power Supply System Considering Load Characteristics. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, vol. 7, iss. 3, pp. 958–968.
12. Chen M., Wen T., Jiang W., Luo J. Modelling and Simulation of New Traction Power Supply System in Electrified Railway. *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Las Palmas, 2015, pp. 1345–1350. DOI 10.1109/ITSC.2015.221.
13. Aoyang H., Litao Y., Li W., Xu J., Wenhui S., Yunfan B. Research on the influence of urban metro traction power supply system on power grid harmonics. *2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS)*. Harbin, 2017. DOI 10.1109/EIIS.2017.8298567.
14. Wei W., Yueliang Ch., Chuanxiu W., Qiu Ch. An Improvement Method of Feeder Protection in DC Traction Power Supply System. *2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*. Chengdu, 2019, pp. 1588–1594. DOI 10.1109/IAEAC47372.2019.8997569.
15. Kang D., Xu J., He X. Structure Scheme and Control Strategy Design of Advanced Traction Power Supply System. *2022 IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. Chengdu, 2022, pp. 69–74. DOI 10.1109/ICIEA54703.2022.10006325.
16. Song H., Zeng L., He X. Power Quality Comprehensive Compensation Strategy for Retrofit Structure of Advanced Traction Power Supply System. *IECON 2023 – 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Singapore, 2023. DOI 10.1109/IECON51785.2023.10312296.
17. Simiyu P., Davidson I.E. Modeling and Simulation of MVDC Traction Power System for High-Speed Rail Transportation. *2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica*. Nairobi, 2021. DOI 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543274.
18. Chen M., Luo J., Jiang W., Wang Y. Study on new traction power supply system for power quality comprehensive compensation in electrified railway. *TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference*. Macao, 2015. DOI 10.1109/TENCON.2015.7372869.
19. Chang J., Da Ch., Guo H., Mao L., Chen W., Pei X. Probabilistic power flow calculation method for subway traction load based on quasi-Monte Carlo and semi-invariant method. *2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA)*. Hefei, 2020. P. 586–591. DOI 10.1109/IFEEA51475.2020.00126.
20. Wang L., Yang X., Xu J., Zheng T.Q. DC Traction System Hardware Emulator for Rail Potential Distribution in DCAT Traction Power Supply System. *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. Shenzhen, 2018. DOI 10.1109/PEAC.2018.8590497.
21. Wang C., Huang Y., Hou F., Li K. Modeling and Simulation of a New Hybrid Transformer for Metro Traction Power Supply System. *2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. Nanjing, 2022, pp. 3350–3355. DOI 10.1109/CIEEC54735.2022.9846385.

22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonessimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complicated asymmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2005. 273 p.

23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka na osnove faznykh koordinat [Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates]. Moscow: Direkt-Media Publ., 2023. 156 p.

24. Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V., Nguyen Quoc Hieu. Modelirovanie rezhimov elektricheskikh setei, pitayushchikh tyagovye podstantsii postoyannogo toka [Modeling of modes of electrical networks feeding DC traction substations]. *Energetik* [The power engineer], 2024, no. 2, pp. 9–13.

25. Kryukov A.V., Suslov K.V., Nguyen Quoc Hieu. Modelirovanie rezhimov sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh ustanovkami invertornoi generatsii [Modeling modes of traction power supply systems equipped with inverter generation units]. *Intellektual'naya elektrotekhnika* [Intelligent Electrical Engineering], 2024, no. 1 (25), pp. 70–85.

26. Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V., Nguyen Quoc Hieu. Umen'shenie garmonicheskikh iskazhenii v elektricheskikh setyakh, pitayushchikh tyagovye podstantsii zheleznykh dorog postoyannogo toka [Reducing harmonic distortions in electrical networks feeding traction substations of DC railways]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy], 2024, no. 4, pp. 51–57.

Информация об авторах

Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: and_kryukov@mail.ru.

Черепанов Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: smart_grid@mail.ru.

Нгуен Куок Хиеу, аспирант кафедры электрических станций, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: hieu12829@mail.ru.

Information about the authors

Andrei V. Kryukov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University; Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: and_kryukov@mail.ru.

Alexandr V. Cherepanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: smart_grid@mail.ru.

Nguyen Quoc Hieu, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Plants, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: hieu12829@mail.ru.

Экспериментальные исследования по определению суммарных боковых сил в кривых участках пути со шпалами типоразмера 1 526 мм

Д.А. Ковенькин¹✉, Р.И. Живин²

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

²Восточно-Сибирская дирекция инфраструктуры – структурное подразделение Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», г. Иркутск, Российская Федерация

✉kovenkin_da@irgups.ru

Резюме

Настоящая работа посвящена анализу результатов экспериментальных исследований движения поездов по участкам пути со шпалами типоразмера 1 526 мм. Такие шпалы в качестве эксперимента используются на Восточно-Сибирской железной дороге в кривых радиусом менее 350 м с 2016 г. В теории применение шпал этого типоразмера должно позволить снизить интенсивность уширения рельсовой колеи. Кроме того, анализ трудозатрат по текущему содержанию пути на участках с такими шпалами показал их снижение. Целью эксперимента являлось определение фактических внешних нагрузок, действующих от подвижного состава на рельсы в зависимости от нагрузки на ось. Для измерения нагрузок по деформации рельса в данном его сечении или на очень коротком отрезке рельса применялся метод Шлупфа. Определялись боковые силы, оказывающие влияние на состояние ширины рельсовой колеи. После проведения аппроксимации получили кривые боковых сил в зависимости от осевых нагрузок. С целью подтверждения достоверности результатов эксперимента были произведены теоретические расчеты. Сравнение итогов теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия элементов рельсошпальной решетки под поездной нагрузкой показывает, что методы и алгоритмы определения вынужденных колебаний рельсов объективно отражают действительность и вполне пригодны для практического использования. Для подтверждения выдвинутых теоретических предположений о надежности шпал колеи 1 526 мм необходимо дальнейшее осуществление подобных экспериментальных исследований для шпал колеи 1 520 и 1 530 мм.

Ключевые слова

шпалы, колея 1 526 мм, боковые силы, метод Шлупфа, кривые участки пути

Для цитирования

Ковенькин Д.А. Экспериментальные исследования по определению суммарных боковых сил в кривых участках пути со шпалами типоразмера 1 526 мм / Д.А. Ковенькин, Р.И. Живин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 78–90. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).78-90.

Информация о статье

поступила в редакцию: 16.09.2024 г.; поступила после рецензирования: 20.09.2024 г.; принята к публикации: 23.09.2024 г.

Experimental studies to determine the total lateral forces in curved sections of track with sleepers of standard size 1 526 mm

D.A. Koven'kin¹✉, R.I. Zhivin²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²The East Siberian Directorate of Infrastructure – a Structural Division of the Central Directorate of Infrastructure – a Branch of JSC «Russian Railways», Irkutsk, the Russian Federation

✉kovenkin_da@irgups.ru

Abstract

This work is devoted to the analysis of the results of experimental studies of train movement along track sections with sleepers of standard size 1 526 mm. Such sleepers, as a pilot experiment, have been used on the East Siberian Railway in curves with a radius of less than 350 m since 2016. In theory, the use of sleepers of this standard size will reduce the intensity of widening of the rail track. In addition, the analysis of labor costs for the current maintenance of the track in such sections showed a decrease. The purpose of the experimental studies was to determine the actual external loads acting from the rolling stock on the rails, depending on the axle load. The Schlumpf method was used to measure the deformation loads of the rail in a given section or on a very short section of the rail. The lateral forces influencing the state of the track width were determined. After the approximation, the curves of the lateral forces were obtained depending on the axial loads. In order to confirm the reliability of the experimental results, theoretical calculations were carried out. A comparison of the results of theoretical and experimental studies of the interaction of the elements of the rail grating under train load shows that the methods and algorithms for determining forced vibrations of rails objectively reflect reality and are quite suitable for practical use. To confirm the theoretical assumptions put forward about the reliability of sleepers of 1 526 mm gauge, it is necessary to conduct similar experimental studies for sleepers of 1520 and 1530 mm gauge.

Keywords

sleepers, 1526 mm gauge, lateral forces, Shlumpf's method, curved sections of the track

For citation

Koven'kin D.A., Zhivin R.I. Eksperimental'nye issledovaniya po opredeleniyu summarnykh bokovykh usilii na krivolineinykh uchastkakh zheleznodorozhnogo puti so shpalami standartnogo razmera 1 526 mm [Experimental studies to determine the total lateral forces in curved sections of track with sleepers of standard size 1 526 mm]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 78–90. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).78-90.

Article info

Received: September 16, 2024; Revised: September 20, 2024; Accepted: September 23, 2024.

Введение

В настоящее время в Восточный полигон входят Красноярская, Восточно-Сибирская, Забайкальская и Дальневосточная железные дороги. Эксплуатационная длина составляет 17 207 км, в том числе электрифицированных линий 9 196 км. Доля двухпутных линий 7 812 км (45,4 %). Оборудовано автоматической блокировкой 12 144 км (70,6 %), полуавтоматической блокировкой 5 063 км (29,4 %), 827 железнодорожных станций и 21 719 искусственных сооружений.

Восточный полигон обеспечивает работу сразу нескольких трансевразийских коридоров:

- перевозки грузов из западных регионов страны в сторону портов Дальнего Востока;
- отправки через железнодорожные сухопутные переходы Дальнего Востока к промышленным центрам Китая;
- отправки по транзитному маршруту через территорию Монголии.

Программа модернизации Восточного полигона включает в себя следующие этапы проекта:

- модернизация Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей (увеличение провозной способности до 210 млн т к 2025 г.);
- сокращение времени контейнерных перевозок до семи суток и увеличение объемов контейнерных перевозок в 4 раза;
- проекты развития Красноярской железной дороги.

Время и политическая ситуация диктуют свои правила. Впервые за всю историю экономики железных дорог грузоперевозки на Восток превысили объем перевозок на Запад. Грузоперевозки в восточном направлении выросли на 10 % и сдерживаются только инфраструктурными ограничениями. В то же время рост грузоперевозок приводит к интенсивному износу существующей инфраструк-

туры, что требует дополнительных затрат на поддержание ее работоспособного состояния. В этой связи в первую очередь необходимо разрабатывать и внедрять конструкции пути с повышенной надежностью, а также совершенствовать существующие конструкции и нормы их содержания.

Изменение условий эксплуатации, повышение осевых нагрузок, увеличение массы поездов, безусловно, ведет к более интенсивному расстройству узлов промежуточных рельсовых скреплений, а также износу рельсовых нитей. Все это приводит к нестабильности ширины рельсовой колеи, особенно в кривых участках пути.

С целью повышения надежности работы конструкции пути на Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД) с 2016 г. в кривые радиусом менее 350 м в качестве эксперимента производится укладка шпал с нормой зашивки 1 526 мм. В теории применение шпал такого типоразмера должно позволить снизить интенсивность увеличения ширины рельсовой колеи и даже при боковом износе рельсов до 18 мм не приведет к ее критическим значениям, требующим снижения скорости или закрытия пути для движения поездов. Так, в работах Д.В. Величко дана оценка влияния типа рельсовых скреплений на размер ширины колеи при сборке рельсошпальной решетки [1, 2]. В связи с этим для подтверждения выдвинутых теоретических предположений необходимо проведение специальных экспериментальных исследований.

Целью экспериментальных исследований являлось определение фактических внешних нагрузок, действующих от подвижного состава на рельсы, получение качественной закономерности и количественных значений, характеризующих особенности интенсивности изменения ширины колеи в кривых участках в зависимо-

сти от параметров пути, осевой нагрузки и скорости движения подвижного состава.

Методика исследований

Испытания проводились на основе тензометрических измерений, выводимых с помощью мобильных устройств в краткосрочный период времени. Подобного рода эксперименты осуществлялись многими учеными: М.Ф. Вериго [3], О.П. Ершковым [4, 5], Н.И. Карпущенко [6, 7], А.Я. Коганом [8, 9], В.О. Певзнером, О.А. Сусловым [10] и др. Достаточно точные методы испытаний апробированы учеными Петербургского государственного университета путей сообщения, которые предложили метод двух сечений [11]. Экспериментальные исследования динамики вагонов в кривых участках ВСЖД малого радиуса с использованием специализированного комплекса проводились в том числе и учеными Иркутского государственного университета путей сообщения [12, 13].

Авторами же для проведения измерений использовался метод, представленный в ГОСТ 34759-2021 [14], который регламентирует способ оценки сил посредством регистрации относительных деформаций с использованием тензорезисторов, соединенных в тензосхемы. Задача является динамической в связи с ударными нагрузками при воздействии колеса на рельс. Процесс изменения нагрузок и вызванных ими деформаций и напряжений протекает достаточно быстро во времени. Для того чтобы регистрировать данные процессы, нужны системы обработки сигналов с определенной частотой дискретизации.

Для измерений относительной деформации рельсов применялись тензорезисторы с номинальным сопротивлением 100 Ом и базой 20 мм. При определении вертикальной и боковой силы, действующей от колеса подвижного состава на рельс, использовались тензорезисторы с разбросом тензочувствительности не более 1 %.

При проведении сбора данных оценке подлежали показатели воздействия на путь от грузовых поездов в реальный момент времени.

Основной измерительной схемой, используемой для определения сил, возникающих при набегании колеса подвижного состава на головку рельса с помощью тензометрирования, является мостовая схема (рис. 1).

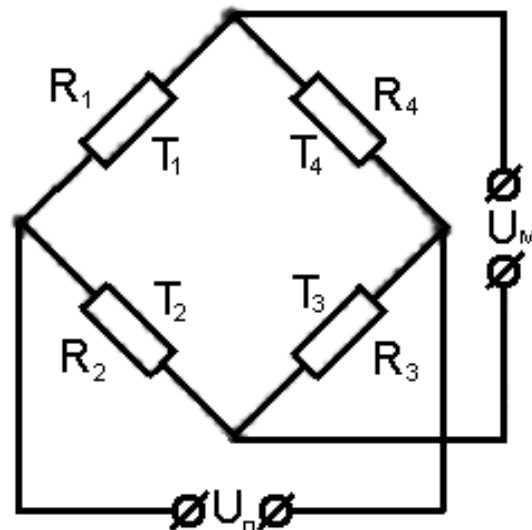


Рис. 1. Схема тензометрического моста с одним тензорезистором в каждом плече:

T_1, T_2, T_3, T_4 – тензорезисторы; U_{Π} – источник питания; $U_{\text{м}}$ – напряжение на выходе моста

Fig. 1. Diagram of a strain gauge bridge with one strain gauge in each arm:

T_1, T_2, T_3, T_4 – tensorisistors; U_{Π} – is the power supply; $U_{\text{м}}$ – is the voltage at the output of the bridge

Для измерения деформации изгиба при наличии деформации растяжения при измерении боковой нагрузки от подвижного состава использовались четыре активных тензорезистора (полный мост). На объект исследования наряду с изгибающим моментом действует растягивающая (сжимающая) сила. Можно установить четыре активных тензорезистора T_1, T_2, T_3 и T_4 и включить их в схему моста. При этом напряжение на выходе моста определяют по формуле:

$$U_{\text{м}} \approx U_{\Pi} \frac{\Delta R}{R}.$$

При такой схеме исключается действие составляющей растяжения, поскольку она вызывает у всех тензорезисторов одинаковое по величине и знаку изменение сопротивления.

Места установки тензорезисторов тщательно очищают от ржавчины, окалины или загрязнений с помощью абразивных средств.

Установка тензорезисторов в зависимости от их типа, назначения и условий испытаний выполнялась наклейкой непосредственно на объект исследования клеями холодного отверждения или экспресс-клеями типа циакрин для тензорезисторов общего назначения.

Для измерения боковых сил по деформации рельса в данном его сечении или на очень коротком отрезке рельса (порядка 1,0 м) использовался метод Шлупфа. Этот метод измерения приложенной к рельсу боковой силы сводится к измерению изгибающих моментов в шейке рельса [15] в точках *A* и *C* (датчиками 1, 2 и 5, 6):

$$M_A = Y_6 \cdot h_1 - Q \cdot e \quad (1)$$

$$M_C = Y_6 \cdot h_2 - Q \cdot e \quad (2)$$

где h_1, h_2 – плечи приложения силы Y_6 ; e – эксцентриситет приложения вертикальной нагрузки (рис. 2).

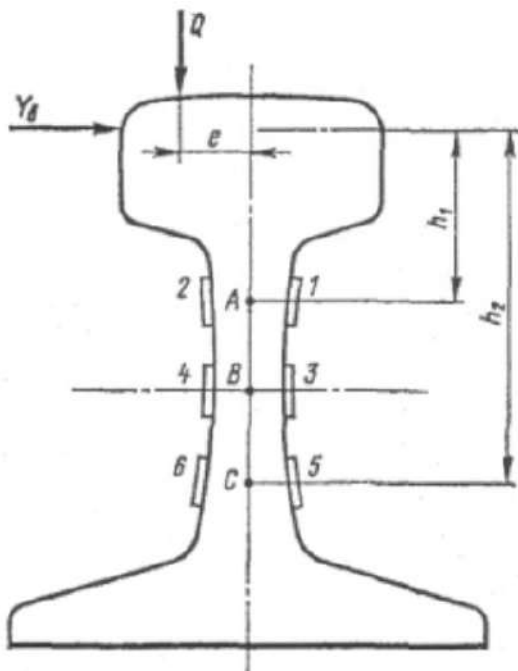


Рис. 2. Схема измерения в заданном сечении рельса динамических вертикальных Q и боковых Y_6 сил, передаваемых колесами подвижного состава: 1–6 – тензорезисторы

Fig. 2. A scheme for measuring dynamic vertical Q and lateral Y_6 forces transmitted by the wheels of a rolling stock in a given rail section: 1–6 – tensoristors

Вычитая (1) из (2), получим выражение боковой силы:

$$Y_6 = \frac{M_A - M_C}{h_2 - h_1}.$$

Точки *A* и *C* выбирают так, чтобы моменты сопротивления горизонтальных сечений, проходящих через эти точки, были равны, а наклеенные вертикально на шейку рельса датчики в точках *A* и *C* испытывали деформации, пропорциональные действующим моментам M_A и M_C . Это

достигается подбором одинаковой толщиной шеек рельсов по оси датчиков в точках *A* и *C*.

Моменты сил M_A и M_C вычитаются электрически в мостовой схеме включением датчиков в сечении *A* в одно плечо моста, а датчиков в сечении *C* – в другое плечо.

Схема измерения с помощью тензорезисторов в сечении рельса динамических вертикальных и боковых сил, передаваемых колесами подвижного состава в пути, показана на рис. 3.



Рис. 3. Схема наклейки тензодатчиков в пути
Fig. 3. Load cell sticker diagram on the track

Для записи регистрируемых параметров применялся программно-аппаратный комплекс, состоящий из измерительного модуля QMBox и ноутбука. Все источники питания тензорезисторов, а также измерительный модуль размещаются рядом с действующим испытательным путем в пределах габарита приближения строений. Тензорезисторы на пути соединяют с регистрирующей аппаратурой специальными кабелями. Получаемые при прохождении подвижного состава данные по измерениям динамических процессов в пути подвергаются обработке по специальным методикам.

Тарировка датчиков

С целью настройки достаточной точности измерений тарировка датчиков проводилась в полевых условиях на экспериментальном участке. Для этого использовалась автомотриса с известной осевой нагрузкой равной 5 т на ось (рис. 4).



Рис. 4. Тарировка тензометрических схем на экспериментальном участке

Fig. 4. Calibration of strain gauge circuits at the experimental site

Измерения проводились в динамике и статике с полной остановкой автомотрисы одной осью над сечением с датчиками. Результаты тарировки боковых сил представлены в виде графиков на рис. 5.

Тарировочные испытания позволили перевести условные единицы измерений при определении боковых сил в абсолютные величины. По данным тарировочных испытаний чувствительность схем к воздействию измеряемых усилий, характеризуемая средним напряжением активных датчиков (в $\text{кг}/\text{см}^2$), при воздействии нагрузки в размере 5 т на ось составила по схеме измерения боковых сил $662,14 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Характеристика участков проведения испытаний

Для проведения тензометрических испытаний по определению боковых нагрузок, передаваемых подвижным составом на рельсы, были выбраны участки пути на ВСЖД, характеристики которых представлены в табл. 1.

В дни испытаний с 3 по 10 июля 2024 г. геометрия рельсовой колеи на экспериментальных участках имела следующие параметры:

1. На первом участке фактическое возвышение рельса – 112 мм, ширина колеи 1 532 мм, износ боковой – 1,3 мм, вертикальный – 0,6 мм.

2. На втором участке фактическое возвышение рельса – 104 мм, ширина колеи 1 546 мм, износ боковой – 8,8 мм, вертикальный – 1,5 мм.

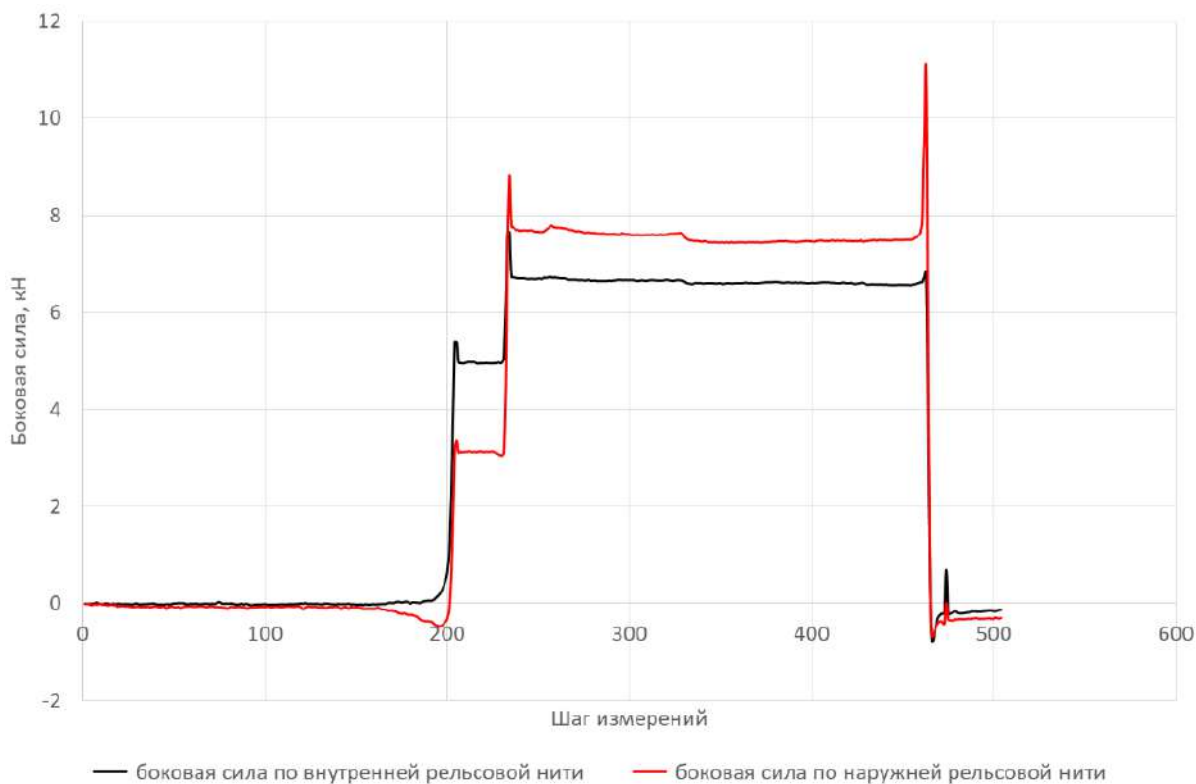


Рис. 5. Результаты тарировки боковых сил

Fig. 5. Lateral force calibration results

Таблица 1. Характеристика участков проведения испытаний
Table 1. Characteristics of test sites

Характеристика участка Section characteristics	ПЧ № 9 ТР № 9	
	1	2
№ участка № plot	1	2
Перегон Section	Большой Луг – Подкаменная	Большой Луг – Подкаменная
Путь Track	1	2
Км, пк Km, pc	5 225 пк 9	5 225 пк 9
Грузонапряженность, млн т · км брутто/км в год Cargo density, mln t · km gross/km per year	64,9	158,4
Типоразмер шпал, мм Standard size of sleepers, mm	1 526	1 526
Установленная скорость, км/ч пасс/груз Set speed, km/h passanger/freight	70/60	70/60
Кривая радиус, м/длина кривой, м Curve radius, m/curve length, m	290/349	298/347
Возвышение наружного рельса, мм Rail mark difference, mm	110	110
Профиль Profile	спуск 6,8	подъем 6,8

На участках проведения эксперимента обращался типовой подвижной состав с локомотивами ВЛ85, ВЛ80р, ЗЭС5К, ЭП1. За опытный период веса поездов распределились следующим образом:

– на первом участке до 3 000 т – 58 %, 3 000–4 100 т – 42 %;

– на втором участке до 3 000 т – 13 %, 3 000–5 000 т – 33 %, 5 001–6 500 т – 27 %, более 6 500 т – 27 %.

В то же время нагрузка на ось распределялась в таких интервалах:

– на первом участке до 10 т на ось – 32 %, 10–15 т – 32 %, более 15 до 20 т – 36 %;

– на втором участке до 16 т на ось – 20 %, 19–21 т – 33 %, 22–23,5 т – 13 %, более 23,5 до 25 т – 34 %.

Состояние пути на первом участке можно оценить как отличное: все элементы новые, так как в мае – июне 2024 г. в данном месте проведен капитальный ремонт первого уровня. Пропущенный тоннаж на экспериментальном участке составил 5,4 млн т брутто. Состояние пути на втором участке удовлетворительное. Результаты прохода вагона путеизмерителя от 22 июня 2024 г. показывают наличие просадок II степени вблизи места проведения измерений. Последний капитальный ремонт прово-

дился в мае 2019 г. Пропущенный тоннаж в момент проведения эксперимента составлял около 800 млн т брутто. Последняя смена наружной рельсовой нити датируется 22 сентября 2023 г.

Результаты измерений

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить фактические внешние нагрузки, действующие от подвижного состава на рельсы. Результаты испытаний представлены в виде осциллограмм (рис. 6–9).

Данные осциллограмм были статистически обработаны [16, 17], результаты сведены в таблицу (табл. 2). При принятом уровне надежности 0,95 согласно правилу трех сигм необходимо как минимум 25 измерений. Всего за время проведения эксперимента на каждом участке были проведены измерения от прохода порядка 50 поездов. В связи с этим можно сделать вывод о повышении надежности доверительных оценок. Если внимательно посмотреть на осциллограммы и сравнить их, то можно заметить, что на втором участке амплитуда колебаний заметно больше, чем на первом. Также на втором участке можно наблюдать остаточные деформации. Конечно, это связано с состоянием пути.

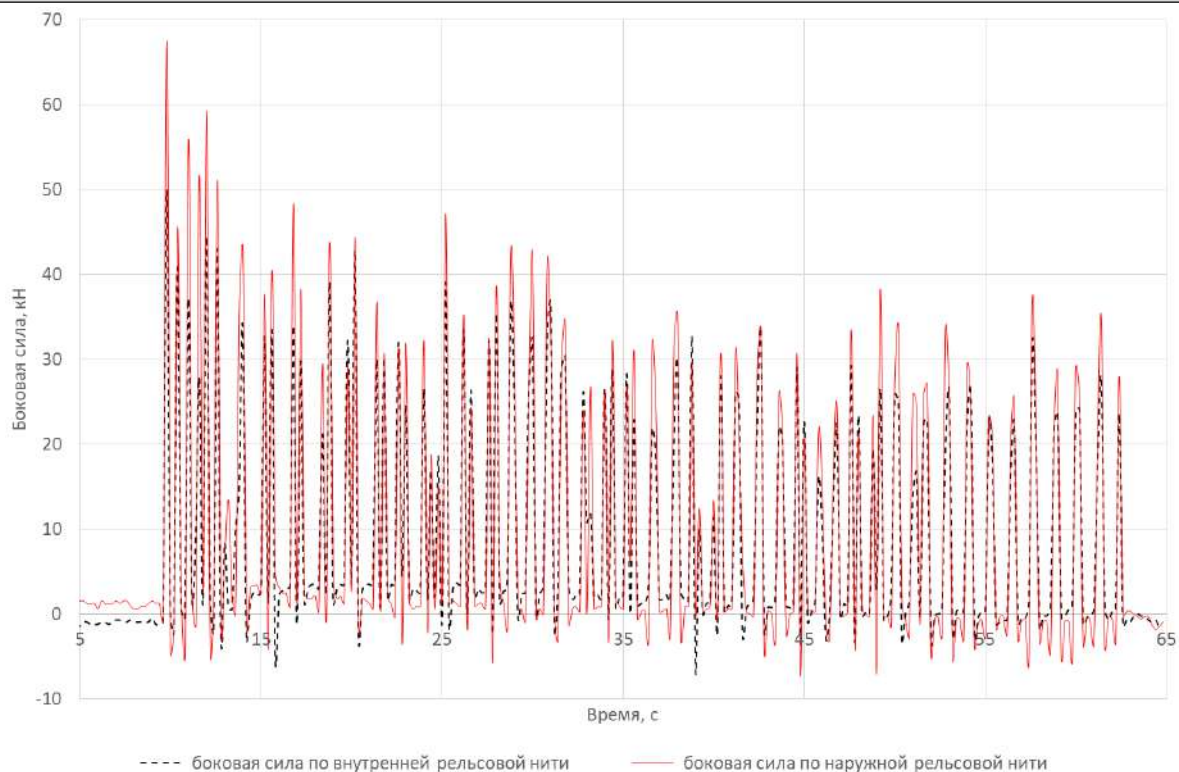


Рис. 6. Образец осциллограммы боковых сил, передаваемых от колеса к рельсу: локомотив 3ЭС5К № 151, вес поезда 3 347 тс, нагрузка на ось 20,04 тс на ось, скорость 47 км/ч, участок № 1

Fig. 6. Sample oscillogram of lateral forces transmitted from wheel to rail: locomotive 3ES5K No. 151, train weight 3 347 ts, axle load 20,04 ts/axle, speed 47 km/h, section No. 1

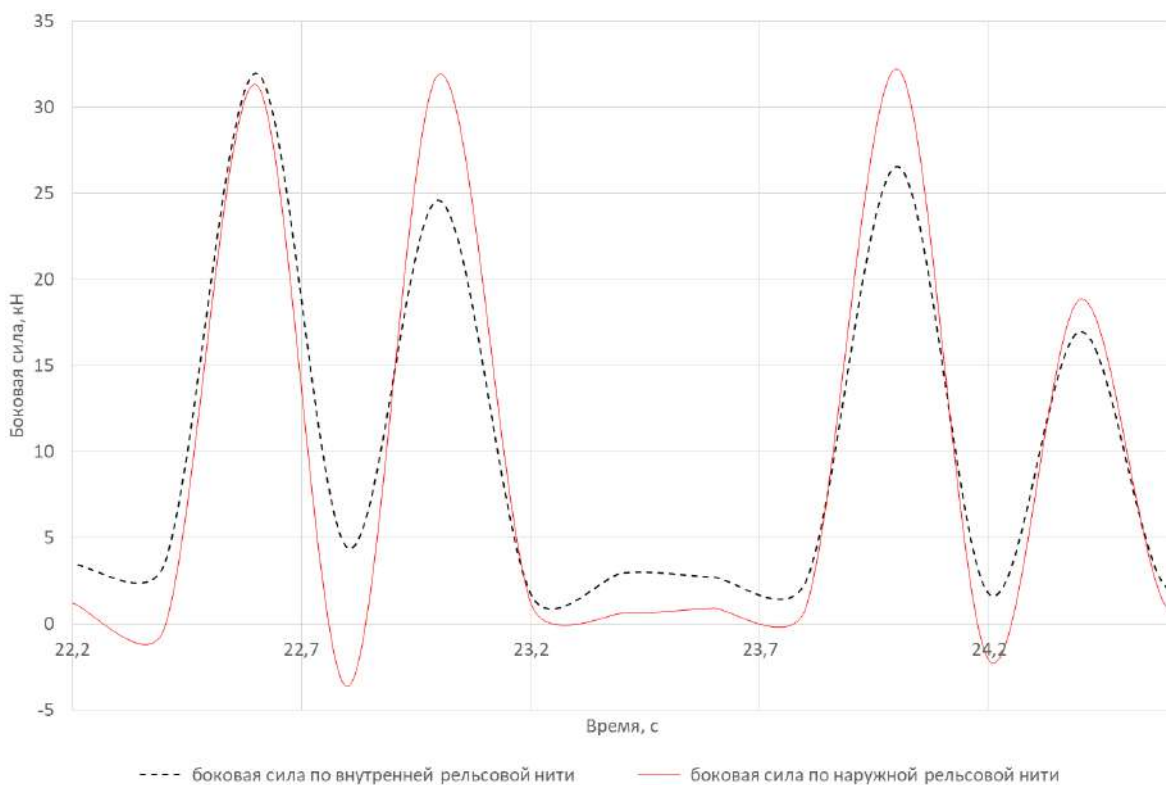


Рис. 7. Фрагмент осциллограммы: проход вагона, участок № 1

Fig. 7. A fragment of the oscillogram: the passage of the carriage, section No. 1

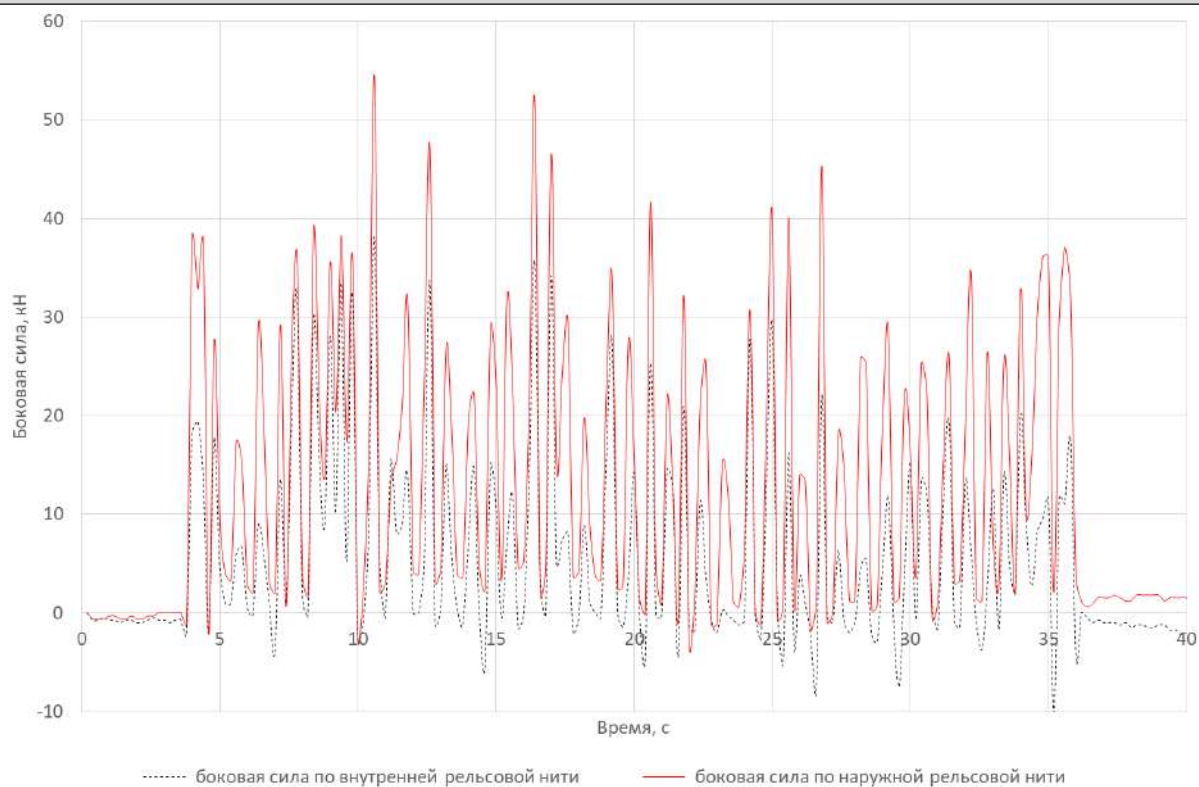


Рис. 8. Образец осциллограммы боковых сил, передаваемых от колеса к рельсу: локомотив 3ЭС5К №537, вес поезда 3 297 тс, нагрузка на ось 19,17 тс/ось, скорость 49 км/ч, участок № 2

Fig. 8. Sample of the oscillogram of lateral forces transmitted from the wheel to the rail:

locomotive 3ES5K No. 537, train weight 3 297 ts, axle load 19,17 ts/axle, speed 49 km/h, section No. 2

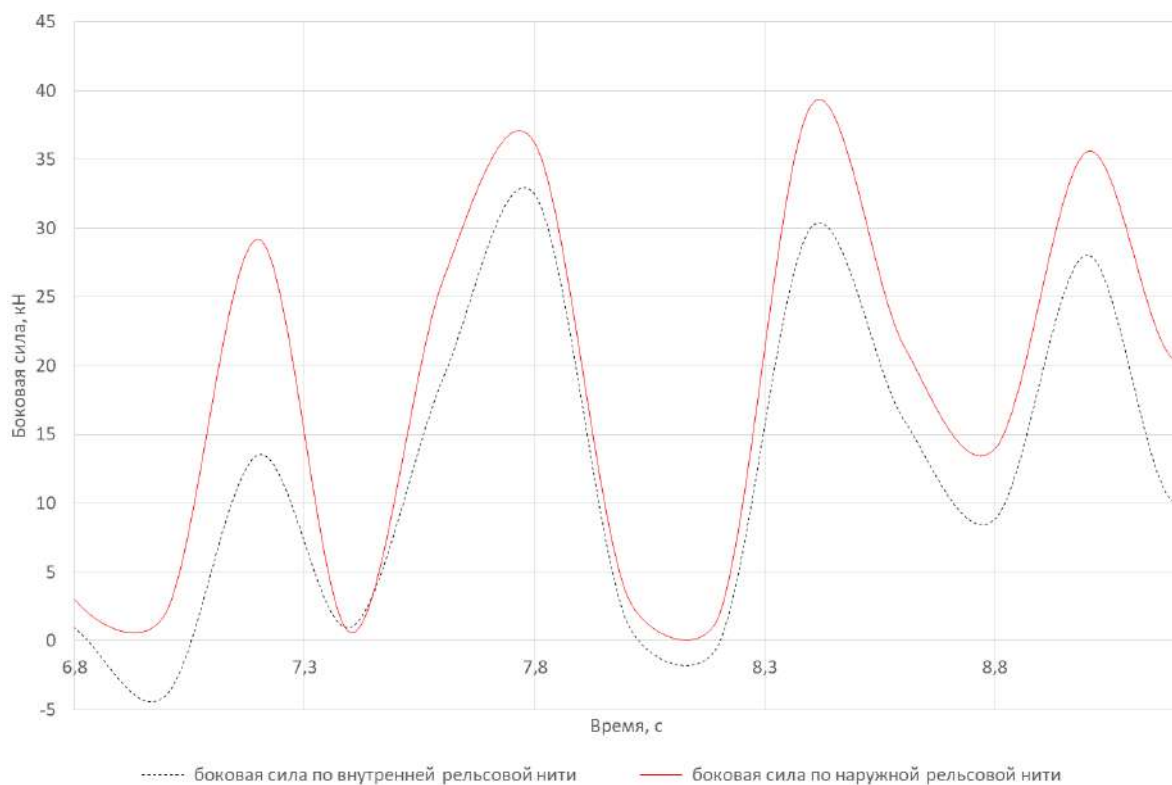


Рис. 9. Фрагмент осциллограммы: проход вагона, участок № 2

Fig. 9. A fragment of the oscillogram: the passage of the carriage, section No. 2

По представленным данным (табл. 2) подвижного состава по пути, от нагрузок на боковые силы, возникающих в рельсах при проходе

Таблица 2. Экспериментальные значения боковых сил, действующих на путь от подвижного состава
Table 2. Experimental values of the lateral forces acting on the path from the rolling stock

№ участка испытаний Test site No	Средняя нагрузка на ось, тс/ось Average axle load, tc/axle	Средняя скорость движения, км/ч Average speed, km/h	Измеренная боковая сила, средние значения, кН Measured lateral force, average values, kN			
			По наружной рельсовой нити On the outer rail	Среднеквадратическое отклонение Root mean square deviation	По внутренней рельсовой нити On the inner rail	Среднеквадратическое отклонение Root mean square deviation
1	6,36	51	9,41	3,28	9,29	2,29
	8,84	51	12,80	9,31	12,95	4,96
	11,10	48	18,52	8,45	14,16	5,39
	14,92	42	21,18	8,12	20,48	6,62
	19,22	47	28,35	7,79	26,63	7,40
2	13,69	48	22,09	7,17	20,20	5,16
	19,57	45	29,47	6,47	28,34	6,20
	21,31	40	30,93	7,65	29,41	7,90
	23,92	45	34,27	7,06	31,75	7,78
	24,72	44	37,54	7,89	34,82	8,97

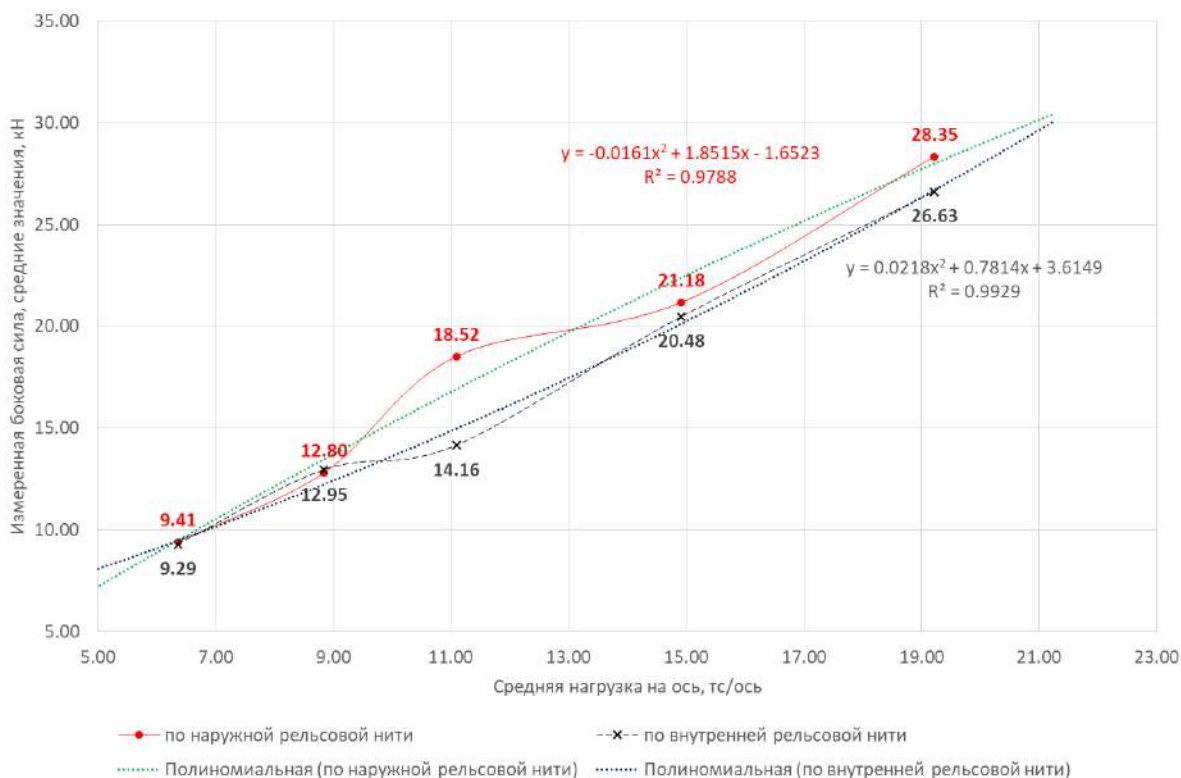


Рис. 10. График зависимости между боковыми силами, передаваемыми от колеса к рельсу и нагрузкой на ось (участок № 1)

Fig. 10. Graph of the relationship between the lateral forces, transmitted from the wheel to the rail and the axle load (section No. 1)

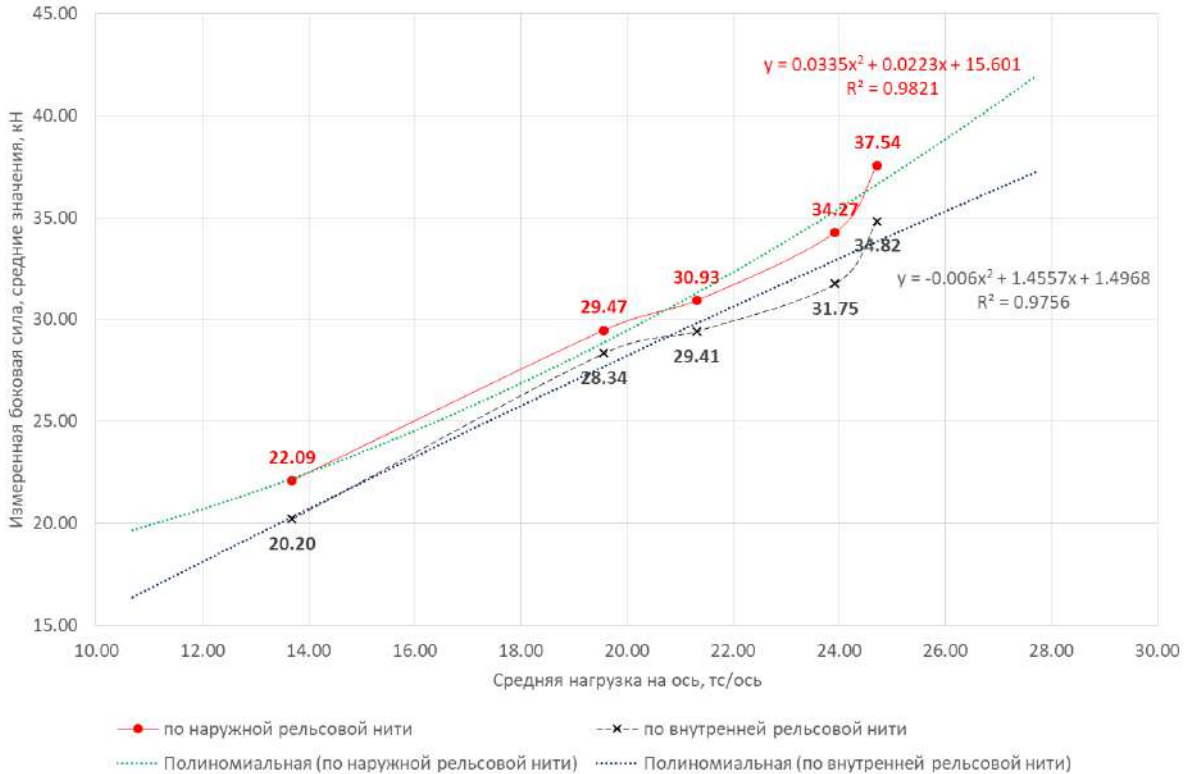


Рис. 11. График зависимости между боковыми силами, передаваемыми от колеса к рельсу и нагрузкой на ось (участок № 2)

Fig. 11. Graph of the relationship between the lateral forces, transmitted from the wheel to the rail and the axle load (section No. 2)

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить фактические внешние нагрузки, оказываемые подвижным составом на рельсы. Определялись боковые силы, влияющие на состояние ширины рельсовой колеи. После проведенной аппроксимации получили кривые боковых сил в зависимости от осевых нагрузок.

С целью подтверждения достоверности результатов эксперимента произведены теоретические расчеты.

Результаты теоретических расчетов

Теоретические расчеты производились с помощью программы «Взаимодействие экипажа и пути при пространственных колебаниях подвижного состава», разработанной под руководством доктора технических наук А.Я. Кога-на. В работе [18] представлены значения нагрузки, рассчитанных по данной методике.

Боковые силы, действующие на рельсы, определяются следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} Y_{B1}(d_{1il}, u_{1il}) &= Y_1(d_{1il}) + Y_{f1}(u_{1il}); \\ Y_{B2}(d_{1il}, u_{1il}) &= Y_2(d_{1il}) + Y_{f2}(u_{1il}), \end{aligned} \right\}$$

где $Y_{B1}(d_{1il}, u_{1il})$ – боковая сила, действующая на наружную рельсовую нить; $Y_{B2}(d_{1il}, u_{1il})$ – боковая сила, действующая на внутреннюю рельсовую нить; $Y_{f1}(u_{1il})$ – сила трения, действующая на левую (наружную) рельсовую нить в поперечном направлении; $Y_{f2}(u_{1il})$ – сила трения, действующая на правую (внутреннюю) рельсовую нить в поперечном направлении; d_{1il} – смещение центра масс i -ой колесной пары l -ой тележки относительно средней линии рельсовой колеи, имеющей отступления от прямолинейного положения в плане; u_{1il} – поперечное перемещение центра масс i -ой колесной пары l -ой тележки относительно продольной оси x .

В табл. 3 представлены результаты расчета боковых сил, действующих на обе рельсовые нити от первой колесной пары по ходу движения в зависимости от осевой нагрузки. Боковые силы определялись при тех же осевых нагрузках и скоростях движения, которые были зафиксированы в ходе эксперимента.

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что методы и алгоритмы определения боковых

нагрузок на рельсы объективно отражают действительность и вполне пригодны для практического использования. В большинстве случаев отклонение экспериментальных данных от расчетных не превышает 5 %. Встречаются отклонения величиной 8–12 %, однако при определении боковых нагрузок экспериментальным методом показаны средние значения. Если же учитывать среднеквадратическое отклонение и ряд случайных факторов (неровности путевой структуры, состояние узлов креплений, состояние ходовых частей подвижного состава и др.), то результаты экспериментов и теоретических расчетов достаточно сопоставимы. В исследованиях Д.В. Овчинникова, А.Ю. Абдурашитова, В.А. Покацкого также определяется уровень взаимодействия подвижного состава и пути в зависимости от его состояния [19].

Заключение

1. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия элементов рельсошпальной решетки под поездной нагрузкой показывает, что методы и алгоритмы определения вынужденных колебаний рельсов объективно отражают дей-

ствительность и вполне пригодны для практического использования.

2. Результаты испытаний позволили установить зависимость величины боковых сил от такого фактора, как осевые нагрузки для участков пути в кривых малых радиусов со шпалами 1 526 мм. В результате эксперимента не удалось снять показания под поездом, движущимся с установленной скоростью. Скорости движения поездов распределились в диапазоне 40–51 км/ч. Следующим этапом необходимо определить влияние скорости движения поездов на распределение боковых нагрузок на обе рельсовые нити.

3. Для подтверждения выдвинутых теоретических предположений о надежности шпал колеи 1 526 мм необходимо проведение подобных экспериментов для шпал колеи 1 520 и 1 530 мм. Также нужно определить остаточные деформации рельсовых нитей после прохода подвижного состава в начальный период эксплуатации. Итогом научной работы должно стать определение области применения шпал колеи 1 526 мм в зависимости от грузонапряженности.

Список литературы

1. Величко Д.В. Влияние типа рельсовых креплений на размер ширины колеи, получаемой при сборке рельсошпальной решетки // Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе : материалы науч.-практ. конф. Новосибирск, 2001. С. 245.
2. Величко Д.В. Влияние конструкций промежуточных креплений на ширину рельсовой колеи // Железные и автомобильные дороги в условиях Сибири : сб. науч. тр. Новосибирск, 2003. С. 108–116.
3. Вериго М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колес. М. : ПТКБ ЦП МПС, 1997. 207 с.
4. Ершков О.П. Построение графиков удельных характеристик и графиков-паспортов вписывания железнодорожных экипажей в кривые (теоретические основы) // Труды ВНИИЖТ. 1963. Вып. 268. С. 64–125.
5. Ершков О.П. Применение графиков-паспортов для оценки воздействия локомотивов на путь в кривых. М. : Транспорт, 1964. 34 с.
6. Карпушенко Н.И. Надежность связей рельсов с основанием. М. : Транспорт, 1986. 148 с.
7. Карпушенко Н.И., Антонов Н.И. Совершенствование рельсовых креплений. Новосибирск : СГУПС, 2003. 299 с.
8. Коган А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М. : Транспорт, 1997. 325 с.
9. Коган А.Я. Вертикальные динамические силы, действующие на путь. М. : Транспорт, 1969. 206 с.
10. Работа пути в условиях тяжеловесного движения / О.А. Сулов, В.О. Певзнер, И.Б. Петропавловская и др. // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. чтения, посвящ. памяти проф. Г.М. Шахунянца. М., 2016. С. 138–140.
11. Результаты оценки силового воздействия тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездов на железнодорожный путь различными методами измерений / А.В. Романов, А.А. Киселев, А.А. Мирошник и др. // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2024. Т. 21. № 2. С. 409–420.
12. Диль В.Ф., Ермоленко И.Ю., Железняк В.Н. Анализ параметров динамики вагона в кривых участках ВСЖД малого радиуса с использованием специализированного комплекса // Безопасность регионов – основа устойчивого развития : материалы IV междунар. конф. Иркутск, 2014. Т. 1-2. С. 104–108.
13. Ермоленко И.Ю., Железняк В.Н., Мартыненко Л.В. Анализ силового воздействия на колесо-рельс в условиях эксплуатации пути на горных перевалах малого радиуса ВСЖД // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VII междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2016. Т. 2. С. 531–534.
14. ГОСТ 34759-2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. Введ. 2022–02–01. М. : Рос. ин-т стандартизации, 2021. 32 с.
15. Шафрановский А.К. Непрерывная регистрация вертикальных и боковых сил взаимодействия колеса и рельса. М. : Транспорт, 1965. 96 с.

16. Непомнящих Е.В., Кирпичников К.А. Диагностика состояния железнодорожного пути и его элементов. Чита : ЗаБИЖТ, 2013. 120 с.
17. Стоянович Г.М. Расчеты верхнего строения пути на прочность и устойчивость. Хабаровск : ДВГУПС, 2013. 79 с.
18. Ковенькин Д.А., Покацкий В.А., Лысак А.С. Повышение стабильности ширины рельсовой колеи в кривых участках пути. Самара : СамГУПС, 2009. 126 с.
19. Уровень взаимодействия подвижного состава и пути в зависимости от его состояния / Д.В. Овчинников, А.Ю. Абдурашитов, В.А. Покацкий и др. // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство : тр. XVII науч.-практ. конф. с междунар. участием. М., 2021. С. 4–13.

References

1. Velichko D.V. Vliyanie tipa rel'sovykh skreplenii na razmer shiriny kolei, poluchaemoi pri sborke rel'soshpal'noi reshetki [The influence of the type of rail fasteners on the size of the track width obtained during the assembly of the rail grating]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy Transsiba na sovremennom etape»* [Proceedings of the Scientific-Practical Conference «Actual problems of the Trans-Siberian Railway at the present stage»]. Novosibirsk, 2001, pp. 245.
2. Velichko D.V. Vliyanie konstruktivnykh promezhutochnykh skreplenii na shirinu rel'sovoi kolei [The influence of intermediate fastener designs on the width of the rail track]. *Sbornik nauchnykh trudov «Zheleznye i avtomobil'nye dorogi v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings «Railways and highways in Siberian conditions»]. Novosibirsk, 2003, pp. 108–116.
3. Verigo M.F. Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava v krivykh malogo radiusa i bor'ba s bokovym iznosom rel'sov i grebnei koles [Interaction of track and rolling stock in small radius curves and the fight against lateral wear of rails and wheel ridges]. Moscow: PTKB TsP MPS Publ., 1997. 207 p.
4. Ershkov O.P. Postroenie grafikov udel'nykh kharakteristik i grafikov-pasportov vpisyvaniya zheleznodorozhnykh ekipazhei v krivye (teoreticheskie osnovy) [Plotting of specific characteristics and schedules-passports inscribing railway crews in curves (theoretical foundations)]. *Trudy VNIIZHT* [Proceedings of the All-Union Scientific-Research Institute of Railway Transport], 1963, iss. 268, pp. 64–125.
5. Ershkov O.P. Primenenie grafikov-pasportov dlya otsenki vozdeistviya lokomotivov na put' v krivykh [Application of schedules-passports to assess the impact of locomotives on the track]. Moscow: Transport Publ., 1964. 34 p.
6. Karpushchenko N.I. Nadezhnost svyazei rel'sov s osnovaniem [Reliability of rail connections with the base]. Moscow: Transport Publ., 1986. 148 p.
7. Karpushchenko N.I., Antonov N.I. Sovershenstvovanie rel'sovykh skreplenii [Improvement of rail fasteners]. Novosibirsk: SGUPS Publ., 2003. 299 p.
8. Kogan A.Ya. Dinamika puti i ego vzaimodeistvie s podvizhnym sostavom [Dynamics of the track and its interaction with rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1997. 325 p.
9. Kogan A.Ya. Vertikal'nye dinamicheskie sily, deistvuyushchie na put' [Vertical dynamic forces acting on the track]. Moscow: Transport Publ., 1969. 206 p.
10. Suslov O.A., Pevsner V.O., Tret'yakov V.V., Gromova T.I., Tret'yakov I.V., Shapetko K.V., Smelyanskaya I.S., Tomilenko A.S. Rabota puti v usloviyakh tyazhelovesnogo dvizheniya [The work of the track in conditions of heavy traffic]. *Trudy XIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Chteniya, posvyashchennye pamyati professora G.M. Shakhnyantsa «Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti»* [Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference. Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhnyants «Modern problems of design, construction and operation of a railway track»]. Moscow, 2016, pp. 138–140.
11. Romanov A.V., Kiselev A.A., Miroshnik A.A., Bushuev M.V. Rezul'taty otsenki silovogo vozdeistviya tyazhelovesnykh i dlinnosostavnykh gruzovykh poezdov na zheleznodorozhnyi put' razlichnymi metodami izmerenii [The results of the assessment of the force effect of heavy and long-component freight trains on the railway track by various measurement methods]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Petersburg State Transport University], 2024, vol. 21, no. 2, pp. 409–420.
12. Dil' V.F., Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N. Analiz parametrov dinamiki vagona v krivykh uchastkakh VSZhD malogo radiusa s ispol'zovaniem spetsializirovannogo kompleksa [Analysis of the parameters of the dynamics of the wagon in the curved sections of the small-radius of East Siberian railway with the use of a specialized complex]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi konferentsii «Bezopasnost; regionov – osnova ustoichivogo razvitiya»* [Proceedings of the IV International Conference «Regional security – the basis of sustainable development»]. Irkutsk, 2014, vol. 1-2, pp. 104–108.
13. Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N., Martynenko L.V. [Analysis of the force effect on the wheel-rail in the conditions of operation of the track on the mountain passes of the small radius of the East Siberian Railway]. *Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the VII International Scientific-Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2016, vol. 2, pp. 531–534.
14. GOST 34759-2021. Zheleznodorozhnyi podvizhnoi sostav. Normy dopustimogo vozdeistviya na zheleznodorozhnyi put' i metody ispytaniy [State Standard 34759-2021. Railway Rolling Stock. Normative limits of railway track interaction and test methods]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii Publ., 2021. 32 p.
15. Shafranovskii A.K. Nepreryvnaya registratsiya vertikal'nykh i bokovykh sil vzaimodeistviya kolesa i rel'sa [Continuous registration of vertical and lateral forces of wheel and rail interaction]. Moscow: Transport Publ., 1965. 96 p.
16. Nepomnyashchikh E.V., Kirpichnikov K.A. Diagnostika sostoyaniya zheleznodorozhnogo puti i ego elementov [Diagnostics of the condition of the railway track and its elements]. Chita: ZabIZhT Publ., 2013, 120 p.
17. Stoyanovich G.M. Rascheti verkhnego stroeniya puti na prochnost' i ustoichivost' [Calculations of the upper structure of the track for strength and stability]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2013. 79 p.

18. Koven'kin D.A., Pokatskii V.A., Lysak A.S. Povyshenie stabil'nosti shiriny rel'sovoi kolei v krivykh uchastkakh puti [Improving the stability of the rail gauge in the curved sections of the track]. Samara: SamGUPS Publ., 2009. 126 p.

19. Ovchinnikov D.V., Abdurashitov A.Yu., Pokatskii V.A., Kadyrov R.R. Uroven' vzaimodeistviya podvizhnogo sostava i puti v zavisimosti ot ego sostoyaniya [The level of interaction of rolling stock and track depending on its condition]. *Trudy XVII nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Vnedrenie sovremennykh konstruksii i peredovykh tekhnologii v putevye khozyaistvo»* [Proceedings of the XVII Scientific and Practical Conference with international participation «Introduction of modern structures and advanced technologies into the track facilities»]. Moscow, 2021, pp. 4–13.

Информация об авторах

Ковенькин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kovenkin_da@irgups.ru.

Живин Роман Ильич, начальник Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», г. Иркутск; e-mail: di_zhivinri@esr.ru.

Information about the authors

Dmitrii A. Koven'kin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kovenkin_da@irgups.ru.

Roman I. Zhivin, Head of the East Siberian Directorate of Infrastructure – a Structural Division of the Central Directorate of Infrastructure – a Branch of JSC «Russian Railways», Irkutsk; e-mail: di_zhivinri@esr.ru.

Анализ состояния транспортно-логистического бизнес-блока холдинга ОАО «РЖД» с целью повышения качества предоставления услуг клиентам железнодорожного транспорта по перевозке навалочных грузов в специализированных контейнерах

Н.В. Власова✉, **В.С. Брытков**

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

✉natalya.vlasova.76@list.ru

Резюме

В настоящее время в условиях существенных ограничений транспортировки грузов перед холдингом ОАО «РЖД» с целью выполнения государственного заказа ставится ряд государственных и социальных задач: обслуживание городов, осуществление социальных перевозок, разработка приоритетных направлений и формирование системы учета доходов от реализации комплексных продуктов и услуг, а также мероприятий по развитию транспортно-логистического бизнеса. Транспортно-логистический бизнес холдинга ОАО «РЖД» включает оказание комплексных логистических услуг с задействованием собственных объектов инфраструктуры (объекты движимого и недвижимого имущества, подвижной состав и универсальная тара, высокотехнологичная упаковка и спецсредства, специализированные контейнеры), а также применение решений цифровой трансформации, кооперацию компетенций транспортно-логистических услуг в ключевых грузообразующих регионах. На сегодняшний день деятельность национального транспортного комплекса ограничена определенными условиями, однако они одновременно создают новые возможности при высокой волатильности транспортно-логистического рынка. Ключевыми ограничениями являются логистические риски и барьеры для импортно-экспортных и транзитных перевозок в долгосрочном периоде, отражающие сокращение ресурсной базы транспортно-логистических услуг к 2030 г., высокая вероятность дефицита пропускных и провозных мощностей международных транспортных коридоров, проходящих по территории России (преимущественно маршрутов международных транспортных коридоров «Восток – Запад») при увеличивающемся спросе на комплексные транспортно-логистические сервисы. Для создания многоаспектных транспортно-логистических объектов инфраструктуры национальная сеть развивается в соответствии с обновленным распределением грузопотоков, предусматривая растущие потребности в части объема перевозок и расширения номенклатуры грузов. Реализация инфраструктурных проектов, запланированных до 2030 г., позволит минимизировать ограничения пропускных и провозных способностей железнодорожных участков и создать резервы роста грузопотоков на период до 2036 г. Таким образом, для повышения доходности транспортно-логистического бизнес-блока и в частности структурного подразделения ОАО «РЖД» – Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом, с учетом перечисленных факторов предлагается проанализировать особенности погрузки и перевозки угля в специализированных контейнерах типа Open top с целью увеличения доходных поступлений от реализации комплекса терминально-складских услуг и эффективного использования грузовых дворов.

Ключевые слова

транспортно-логистический бизнес-блок, транспортно-логистические услуги, Восточно-Сибирская дирекция по управлению терминально-складским комплексом, навалочный груз, крупнотоннажный специализированный контейнер Open top

Для цитирования

Власова Н.В. Анализ состояния транспортно-логистического бизнес-блока холдинга ОАО «РЖД» с целью повышения качества предоставления услуг клиентам железнодорожного транспорта по перевозке навалочных грузов в специализированных контейнерах/ Н.В. Власова, В.С. Брытков// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 91–106. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).91-106.

Информация о статье

поступила в редакцию: 02.09.2024 г.; поступила после рецензирования: 10.09.2024 г.; принята к публикации: 12.09.2024 г.

Analysis of the state of the transport and logistics business-block of the Russian Railways holding company in order to improve the quality of services provided to railway customers for the transportation of bulk cargo in specialized containers

N.V. Vlasova✉, **V.S. Brytkov**

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉natalya.vlasova.76@list.ru

Abstract

Currently, under the conditions of significant restrictions on cargo transportation, the Russian Railways holding company, in order to fulfill the state order, is assigned state and social tasks, namely servicing cities, social transportation, developing priority areas and a system for income accounting from the sale of complex products and services, as well as measures for the development of transport and logistics business. The transport and logistics business of the Russian Railways holding company provides comprehensive logistics services using its own infrastructure facilities, namely movables and real estate, the use of rolling stock and universal packaging, high-tech packaging and special equipment, the use of digital transformation solutions, synergy of transport and transport competencies. logistics services in key cargo-generating regions. Currently, the national transportation complex operates under conditions of significant restrictions, which at the same time create new opportunities with high volatility of the transport and logistics market. The key limitations for the development of transport and logistics business are logistics risks and barriers to import-export and transit transportation in the long term, reflecting the reduction in the resource base of transport and logistics services by 2030 year, a high probability of a shortage of throughput and carrying capacity of international transport corridors passing through the territory of the Russian Federation (mainly the routes of the East-West international transport corridors) with an increasing demand for integrated transport and logistics services. To create comprehensive transport infrastructure, the national network of infrastructure facilities is developing in accordance with the updated distribution of cargo flows, providing for growing needs in terms of transportation volumes and expanding the range of goods. The implementation of infrastructure projects planned until 2030 will make it possible to minimize restrictions on the throughput and carrying capacity of railway sections and create reserves for the growth of freight flows in the period until 2036. Thus, in order to increase the profitability of the transport and logistics business unit and in particular the structural unit - the East Siberian Directorate for the Management of the Terminal and Warehouse Complex of JSC Russian Railways, taking into account the above factors, it is proposed to analyze the features of loading and transporting coal in specialized open top containers in order to increase revenue from the sale of a complex of terminal and warehouse services and the effective use of cargo yards.

Keywords

transport and logistics business-block, transport and logistics services, East Siberian directorate for managing the terminal and warehouse complex, bulk cargo, large-capacity specialized Open top container

For citation

Vlasova N.V., Brytkov V.S. Analiz sostoyaniya transportno-logisticheskogo biznes-bloka kholdinga ОАО «RZhD» s tsel'yu povysheniya kachestva predostavleniya uslug klientam zheleznodorozhnogo transporta po perevozke navalochnykh gruzov v spetsializirovannykh konteynerakh [Analysis of the state of the transport and logistics business-block of the Russian Railways holding company in order to improve the quality of services provided to railway customers for the transportation of bulk cargo in specialized containers]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 91–106. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).91-106.

Article info

Received: September 2, 2024; Revised: September 10, 2024; Accepted: September 12, 2024.

Введение

Цель научной статьи – проведение анализа состояния транспортно-логистического бизнес-блока холдинга ОАО «РЖД» для повышения качества предоставления услуг клиентам железнодорожного транспорта по перевозке навалочных грузов в специализированных крупнотоннажных контейнерах типа Open top, отвечающих текущим и перспективным потребностям транспортного рынка, на примере Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом (ВС ДМ).

В статье исследовались вопросы контейнеризации перевозок, клиентоориентированности в новых экономических условиях открытого для конкуренции транспортного рынка приоритетных направлений развития и системы учета доходов от реализации различных видов услуг.

На сегодняшний день развитие функционала транспортно-логистического бизнеса в

области контейнеризации перевозок реализуется за счет роста транспортно-экспедиционных услуг, предоставляемых сервисами терминально-складской деятельности, и посредством усложнения интегрированных цепей поставок клиентам железнодорожного транспорта. Консолидация и объединение компетенций, включая выполнение мультимодальных перевозочных процессов, осуществляется Транспортно-логистическим бизнес-блоком (ТЛББ) холдинга ОАО «РЖД». В его состав входит Центр фирменного транспортного обслуживания (ЦФТО), Центральная дирекция по управлению терминально-складским комплексом (ЦМ), а также дочерне зависимые общества (ДЗО) – АО «РЖД Логистика», АО «РЖД Бизнес-Актив», АО «Федеральная грузовая компания» (АО «ФГК»), АО «Объединенная транспортно-логистическая компания – Евразийский железнодорожный альянс» (АО «ОТЛК ЕРА»),

ООО «РЖД Терминал», ООО «ТЛЦ «Белый Раст» (рис. 1).

Перед данным бизнес блоком ОАО «РЖД» поставлены следующие задачи:

- разработка новых комплексных продуктов и услуг, адаптированных к потребностям грузоотправителей и грузополучателей, а также к потребностям рынка, развитие комплексных транспортно-логистических услуг (ТЛУ) для обеспечения клиентоориентированного подхода при формировании интегрированных цепей поставок, привлечения высокодоходных грузов и транзитных грузо- и контейнеропотоков;

- развитие и реализация мероприятий, направленных на повышение качества ТЛУ и оптимизацию времени доставки грузов для всех видов отправок;

- развития контейнеризации грузопотоков, доставленных в установленные сроки;

- развитие новых направлений и технологии перевозок грузов разной номенклатуры;

- удовлетворение спроса клиентов по предоставляемым ТЛУ;

- повышение эффективности и устойчивости транспортного логистического бизнеса холдинга ОАО «РЖД» на евразийском рынке ТЛУ;

- строительство новых транспортно-логистических центров (ТЛЦ), хабов в соб-

ственности холдинга ОАО «РЖД»;

- применение и разработка новых видов подвижного состава, контейнеров погрузочных механизмов [1–3].

Организационная структура транспортно-логистического бизнес-холдинга ОАО «РЖД»

ЦФТО является координационным структурным элементом холдинга ОАО «РЖД», принимающим участие в организации и контроле деятельности бизнес-единиц транспортно-логистического бизнеса (ТЛБ).

Будучи сформированным с целью создания Системы фирменного транспортного обслуживания (СФТО) и реализации формата «одного окна» для клиента, ЦФТО обеспечивает выполнение следующих задач:

- рост доходов ОАО «РЖД» за счет предоставления услуг, связанных с транспортировкой, хранением, переработкой грузов на инфраструктурных комплексах железнодорожного транспорта общего пользования;

- достижение целевых параметров развития, предусмотренных Концепцией развития ТЛБ холдинга ОАО «РЖД»;

- в сфере грузовых перевозок на основе принципов клиентоориентированности усиление позиций ОАО «РЖД» на транспортном рынке;

- обновление и модернизацию системы



Рис. 1. Транспортно-логистический бизнес-блок холдинга ОАО «РЖД»
Fig. 1. Transport and logistics business unit of the Russian Railways holding company

транспортного обслуживания грузоотправителей;
– реализацию гибкой тарифной политики железнодорожных перевозок грузов на внутрироссийском, экспортно-импортном и транзитном сообщениях;

– улучшение качества коммерческой работы, а также работы в области внешнеэкономической деятельности и таможенных правоотношений.

ЦМ оказывает различные виды услуг на 662 современных инфраструктурных комплексах и терминалах по всей сети железных дорог России, гарантирует доступ к инфраструктуре ОАО «РЖД» для малых и средних предприятий и монологистических населенных пунктов.

Деятельность ЦМ осуществляется по трем основным направлениям:

1. Коммерческое. В целях привлечения на железнодорожный транспорт клиентов и получения прибыли от начально-конечных операций и дополнительных услуг. Она заключается в организации работ на объектах терминально-складского комплекса, в местах общего пользования (МОП) и на инфраструктуре клиентов.

2. Социальное (государственное), предусматривающее обеспечение выполнения установленных Федеральным законом «О железнодорожном транспорте в Российской Федерации» от 10 января 2003 г. № 17-ФЗ функций и обязанностей по реализации социальных, государственных и мобилизационных задач, осуществлению доступа к инфраструктуре железнодорожного транспорта на недискриминационной основе.

3. Производственное. Деятельность в интересах ОАО «РЖД», в том числе выполнение грузовых операций с щебнем для ремонтно-путевых работ, перегруз вагонов различной колеи на пограничных станциях, устранение коммерческих неисправностей, последствий чрезвычайных ситуаций и т.д.

В современных условиях приоритеты ЦМ включают реализацию проектов, направленных на развитие объектов терминальной инфраструктуры опорной сети ТЛЦ, приближенных к пунктам пропуска через государственную границу, на маршрутах, проходящих по территории Российской Федерации, а также создание сети универсальных городских терминалов.

АО «РЖД Логистика» – один из лидеров российского рынка логистического аутсорсинга

для промышленных предприятий, предоставляющий комплексные услуги по управлению цепями поставок, мультимодальный оператор, созданный для развития логистического бизнес-холдинга ОАО «РЖД». Основные виды деятельности: грузовая логистика (перевозка в полувагонах, хопперах, крытых вагонах); мультимодальные контейнерные перевозки; агрологистика (перевозка сельхозпродукции и фармацевтики в автономных рефрижераторных контейнерах); управление цепями поставок (логистика промышленных предприятий); проектная логистика (перевозка негабаритных грузов). Миссия АО «РЖД Логистика» – обеспечивать высокотехнологичный и надежный сервис перевозки, хранения и экспедирования груза, организацию цепей поставок и комплексное логистическое обслуживание предприятий.

АО «РЖД Бизнес Актив» – мультимодальная транспортная компания, предназначенная для предоставления ТЛУ российским и зарубежным предприятиям за счет использования и развития контейнерных терминалов ЦМ. Основной вид деятельности: оказание услуг по организации мультимодальных контейнерных перевозок. Активы включают фитинговые платформы и крупнотоннажные контейнеры. Целевая бизнес-модель АО «РЖД Бизнес Актив» – мультимодальный контейнерный оператор, использующий современные цифровые технологии для предоставления высококачественных услуг.

АО «ФГК» – оператор универсального подвижного состава. Миссия компании – предоставление подвижного состава и различных видов контейнеров под перевозку грузов, а также в аренду, транспортное экспедирование грузовых перевозок.

АО «ОТЛК ЕРА» – совместное предприятие ОАО «РЖД» (33,3 %), АО «Национальная компания «Казахстан темир жолы» (33,3 %) и Государственного объединения «Белорусская железная дорога» (33,3 %). Компания предоставляет услуги в сфере транзита контейнеров на трансъевразийских маршрутах перевозок через территорию России, Казахстана и Республики Беларусь в составе регулярных контейнерных поездов из Китая и в Китай посредством оперирования собственным и привлеченным подвижным составом. Операционная модель АО «ОТЛК ЕРА» разработана на основании базовых принципов, согласованных его

акционерами, и положений Меморандума о содействии устойчивому развитию транзитного потенциала и экологической безопасности железнодорожного транспорта государств – членов ЕАЭС. Основные виды деятельности компании: дополнительные сборы и платежи; пользование вагоном на маршруте контейнерного сервиса; погрузо-разгрузочные операции с контейнерами в начальном и конечном пунктах маршрута контейнерного сервиса; информационное сопровождение и отслеживание перемещения груза в пути следования; транзитное таможенное декларирование.

ООО «РЖД Терминал» – ведет деятельность в сфере реализации проектов по созданию объектов транспортно-логистической инфраструктуры с участием холдинга «РЖД» для обеспечения новых технологических возможностей обработки грузопотоков, осуществляемых железнодорожным транспортом. Основные виды деятельности: реализация проектов ООО «ТЛЦ «Белый Раст» и «ТЛЦ «Восток – Запад», а также иных проектов с участием ОАО «РЖД» и частных инвесторов в целях увеличения грузопотока на ОАО «РЖД».

ООО «ТЛЦ «Белый Раст» – совместное предприятие ООО «РЖД Терминал» (51 %) и МКОО «Хуаньцю Тунда» (ГК «Ляонин Порт») КНР (49 %) (паритетное управление), осуществляющее операционную деятельность терминального оператора с функционалом, обеспечивающим выполнение необходимых операций при обработке грузов, перевозимых в контейнерах, с развитыми сопутствующими услугами. Основные виды деятельности: погрузочно-разгрузочные работы с контейнерами и их хранение; таможенные услуги; склад-

ские услуги; организация доставки в регионе расположения [4–7].

ПАО «ТрансКонтейнер» – интермодальный контейнерный оператор, в ведении которого находится крупнейший в России парк контейнеров и фитинговых платформ на всей сети железных дорог стандарта 1 520 мм. Общество предоставляет возможность перевозки грузов с использованием специализированных контейнеров: термос-контейнеры (для скоропортящихся грузов); балк-контейнеры (для насыпных грузов); Open top контейнеры (для крупногабаритных и навалочных грузов).

Факторный анализ перевозки контейнеризированных грузов

Значимой тенденцией на рынке грузоперевозок является быстрое развитие сегмента перевозок контейнеризированных грузов. С 2021 по 2023 г. объем перевозок грузов в контейнерах увеличивался в среднем на 14 % в год в двадцатифутовом эквиваленте (ДФЭ) (рис. 2). В 2023 г. перевозки составили 6 521 тыс. ДФЭ, несмотря на уход международных контейнерных операторов. Однако на 21 % – до 846 тыс. ДФЭ снизился объем транзитных перевозок. Сокращение объемов транзитного сообщения преимущественно связано с уменьшением судозаходов контейнерных линий в морские порты России, с повышением доступности слотов на перевозку между странами Азии и Евросоюзом, снижением потребности европейских потребителей. В 2024 г. железнодорожный контейнерный рынок уже вернулся к докризисным темпам роста и по итогам года превысит 7 млн ДФЭ [8–10].

В сегменте перевозок контейнеризированных грузов холдинг «РЖД» представлен компаниями АО «ФГК», АО «РЖД Логистика»,

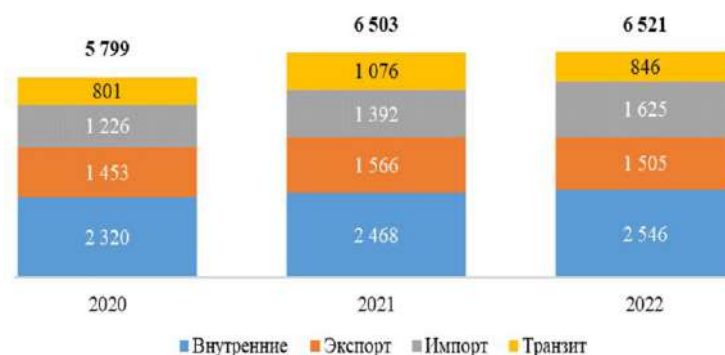


Рис. 2. Структура перевозок контейнеров на сети ОАО «РЖД» по видам сообщения в 2021–2023 гг., тыс. ДФЭ

Fig. 2. Structure of container transportation on the Russian Railways network by type of service in 2021–2023, thousand TEU

АО «РЖД Бизнес-Актив», АО «ОТЛК ЕРА». В связи с ожидаемым расширением сферы контейнерных перевозок целесообразно наращивание собственного парка фитинговых платформ. В 2023 г. парк фитинговых платформ российских операторов составил 116 тыс. ед. Компании ПАО «Трансконтейнер» используют парк 40 тыс. платформ (34 %) и грузовая компания FESCO – 10 тыс. платформ (9 %) [11, 12].

В части анализа динамики доходной ставки и индексации тарифов на перевозки грузов в контейнерах необходимо отметить следующее: согласно проанализированным данным о структуре контейнерного экспорта, 56,9 % перевозок контейнерных грузов по итогам 2023 г. занимает транспортировка продукции целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК).

Общей тенденцией для экспортной контейнерной логистики в 2023 г. явилось существенное увеличение дальности перевозок в связи с переориентацией российского экспорта с западного направления на восточное. При сохранении средней дальности перевозки в западном и южном направлениях по основным группам грузов, экспортируемых в контейнерах, протяженность маршрутов на восток увеличилась:

– по продукции ЦБК с 2 870,2 км в 2021 г. до 3 099,4 км в 2023 г. (на 8,0 %); по химикатам (включая соду) – с 2 538,5 до 3 066,9 км (на 20,8 %).

Наибольшее изменение тарифов в 2021–2023 гг. произошло в части перевозок черных и цветных металлов: рост к базовому уровню на начало 2021 г. составил 56,9 % (рис. 3). Кроме того, следует отметить существенный рост тарифов на перевозку продукции легкой промышленности (25,3 %), а также химикатов и соды (18,0 %).

Сегодня, несмотря на современные тренды международных организаций, занимающихся биоэнергетикой, уголь сохраняет позиции в качестве основной экспортной номенклатуры, перевозимой железнодорожным транспортом. По прогнозам Международного энергетического агентства на период до 2050 г., объем производства энергии за счет ископаемых источников сохранится. Основным направлением роста импортных перевозок традиционно станет восточное за счет наращивания торгового взаимодействия с Китаем. Сохранение положительной динамики на западном направлении в перспективе будет связано с ростом торгового взаимодействия со странами Африки. Для эффективного наращивания объемов и доходов от контейнерных перевозок ТЛББ холдинга ОАО «РЖД» предлагается проанализировать деятельность дирекции по управлению терминально-складским комплексом и рассмотреть перевозку угля в специализированных контейнерах типа Open top [13, 14].

Основными видами грузов, перерабаты-

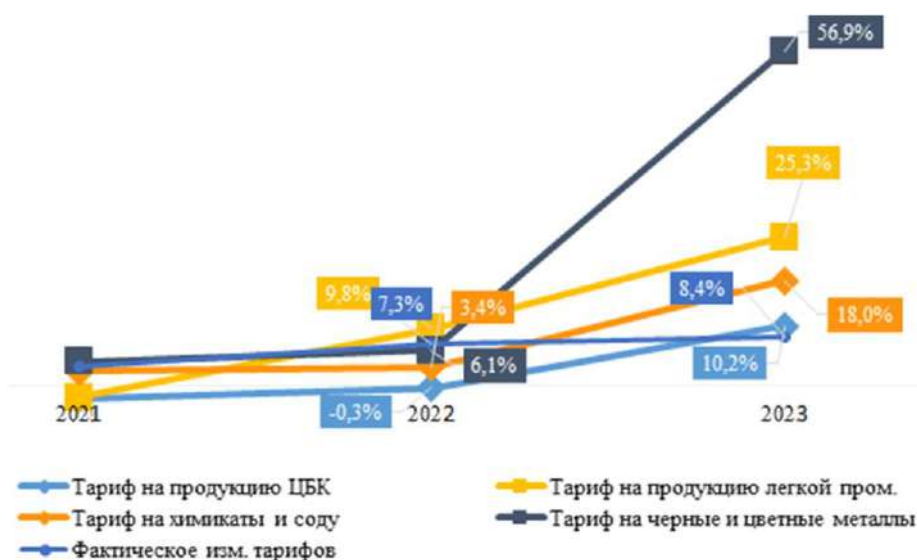


Рис. 3. Сравнение динамики фактического уровня тарифов на ключевые группы грузов (руб./ткм) и фактическое изменение тарифов (накоплением) к уровню базового 2020 г.

Fig. 3. Comparison of the dynamics of the actual level of tariffs for key groups of cargo (RUB/tkm) and the actual change in tariffs (accumulated) to the level of the base 2020

ваемых ВС ДМ ОАО «РЖД», являются грузы в контейнерах, насыпные, тяжеловесные и тарно-штучные (табл. 1, рис. 4).

Таблица 1. Структура перерабатываемых грузов Восточно-Сибирской дирекцией по управлению терминально-складским комплексом в 2021–2024 гг.

Table 1. The structure of processed goods by the East Siberian Directorate for the Management of the terminal and warehouse complex in 2021–2024

Наименование груза Name of cargo	Объем перерабатываемых грузов в год, % Volume of processed cargo per year, %			
	2021	2022	2023	2024
Контейнеры Containers	43,5	60,1	62,7	60,5
Тарно-штучные Piece goods	7,7	9,6	7,1	11,4
Тяжеловесные Heavyweight	8,7	11,4	11,2	12,2
Лесные Timber	7,2	3,4	3,3	5,7
Навалочные Bulk	33,0	15,5	15,6	10,2

Из диаграммы видно, что большая часть перерабатываемых грузов приходится на контейнеры (в среднем 56,7 %).

Контейнерные перевозки являются эффективным и надежным способом доставки грузов по всему миру. Они обеспечивают сохранность груза, сокращают затраты на транспортировку и упрощают логистические процессы.

Контейнерные перевозки играют важную роль в международной торговле и экономическом развитии, обеспечивая своевременную доставку товаров и удовлетворение потребностей потребителей. В связи с этим важно организовать перевозку контейнеров с соблюдением всех необходимых стандартов и регуляций, чтобы обеспечить безопасность грузов и эффективность доставки.

Перевозки контейнеров в целом по сети по итогам 2023 г. достигли исторического максимума – 7,4 млн ДФЭ, что на 14,1 % больше уровня 2022 г. Увеличение объемов обеспечено во всех видах сообщения, в том числе внутри страны (+18,1 %), экспорте (+10,3 %) и импорте (+18,6 %). Динамический рост контейнерных

перевозок стал логическим результатом развития инфраструктуры и применения инновационных технологий [15].

На балансе ВС ДМ ОАО «РЖД» 25 объединенных производственных участков (ПУ), которые предоставляют ТЛУ клиентам железнодорожного транспорта. Основной доход ВС ДМ получает от подсобно-вспомогательной деятельности (ПВД), которая напрямую зависит от рода груза и территориального расположения производственных участков. Данные по доходам от переработки грузов различной номенклатуры ВС ДМ представлены на рис. 4.

Проанализировав сведения из отчетов ВС ДМ по переработке грузов за 2019–2024 гг., можно отметить, что максимальные доходы дирекции за 2023 г. составили 396 122,1 тыс. руб. в основном за счет производственных участков ст. Касьяновка, Тальцы, Тайшет (рис. 5).

Увеличение доходов в 2023 г. по сравнению с 2022 г. произошло за счет переработки грузов в контейнерах, так как весь контейнеропоток был переориентирован на восточное направление. Логистика контейнерного вагонопотока в экспортно-импортном отношении переориентировалась на Китай в связи с выдвинутыми санкциями против России со стороны недружественных стран. В основном крупными поставщиками товаров народного потребления в Россию и потребителями российской сырьевой продукции являются Китайская Народная Республика и поддерживающие РФ страны Азиатско-Тихоокеанского экономического сотрудничества, которые нацелены на свой экономический рост, взаимодействие в области торговли и повышение качества жизни населения. Восточный полигон явился основным направлением данного контейнеропотока [16].

Переработка угля выполняется на грузовых дворах ст. Касьяновка, Военный Городок, Северобайкальск, Усть-Илимск, Черемхово. Анализ работы за 2019–2023 гг. представлен на рис. 6.

Установлено, что лидирующие позиции по переработке угля занимает грузовой двор ст. Касьяновка, но в 2023 г. наблюдается снижение погрузки по сравнению с 2022 г. на 2 981 вагон. Сокращение произошло по причине отклонения заявок на перевозку грузов по форме ГУ-12, так как согласование заявок проводится предприятиям, осуществляющим добычу полезных ископаемых. Увеличилось число выгруженных вагонов на 570 ед. в 2023 г. на

грузовом дворе ст. Саянтуй. В 2023 г. по сравнению с 2022 г. на 352 вагона выросла погрузка угля на грузовом дворе ст. Военный Городок. Это произошло за счет реализации проекта по

формированию биг-бэгов силами ВС ДМ ОАО «РЖД» на основании договора, заключенного с ООО НК «Сибирь» [17].



Рис. 4. Доходы от переработки грузов различной номенклатуры Восточно-Сибирской дирекцией по управлению терминально-складским комплексом в 2019–2023 гг. и первом квартале 2024 г.

Fig. 4. Revenues from the processing of goods of various nomenclature by the East Siberian Directorate for the Management of the terminal and warehouse Complex in 2019–2023 and the first quarter of 2024

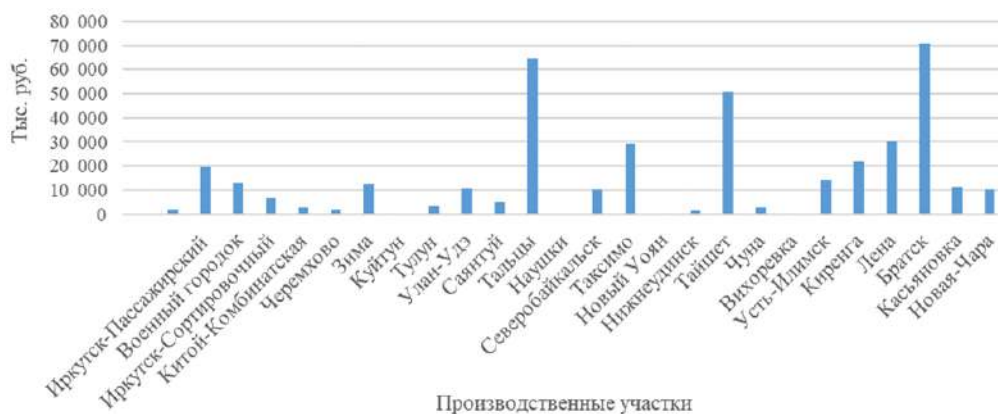


Рис. 5. Доходы от переработки грузов по производственным участкам различной номенклатуры Восточно-Сибирской дирекцией по управлению терминально-складским комплексом в 2023 г.

Fig. 5. Income from cargo processing at production sites of various types by the East Siberian Directorate for the management of the terminal and warehouse complex in 2023



Рис. 6. Анализ переработки угля на грузовых дворах станций Военный Городок, Саянтуй, Северобайкальск, Касьяновка, Усть-Илимск, Черемхово в 2019–2023 гг.

Fig. 6. Analysis of coal processing at the cargo yards of Voennyi Gorodok, Sayantui, Severobaikal'sk, Kasyanovka, Ust-Ilimsk, Cheremkhovo stations in the 2019–2023

Инновационные подходы в предоставлении комплекса услуг по переработке навалочных грузов на объектах Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом

Глобализация мировой экономики и торговли превратила контейнерную транспортную систему в транспортную индустрию. Контейнеризация охватила не только генеральные грузы, но и навалочные.

Погрузка угля на грузовых дворах ВС ДМ ОАО «РЖД» в специализированные контейнеры типа Open top создаст предпосылки для географической, технологической мобильности ТЛББ и позволит использовать для погрузки универсальные краны большой грузоподъемностью, в случае потери грузопотока навалочных грузов в контейнерах не потребуется демонтажа контейнерных терминалов и технологических сооружений, а мобильное оборудование и тара могут быть востребованы на транспортном рынке.

Контейнеризация позволит повысить качество перевалки в порту за счет уменьшения количества перегрузочных операций.

Грузоотправитель обязан подготовить уголь к перевозке в соответствии с требованиями нормативных документов ОАО «РЖД» – «Технических условий погрузки и крепления груза в вагонах и контейнерах» (ТУ) и «Соглашений о Международном железнодорожном грузовом сообщении» (СМГС), технических условий, стандартов и другой технической документации на груз. До предъявления к пере-

возке грузов, подверженных смерзанию, отправитель обязан принять меры к уменьшению их влажности до безопасных в отношении смерзания пределов, установленных нормативными документами. Груз разместить насыпью равномерно по всей площади пола контейнера, симметрично его продольной и поперечной плоскостям симметрии, согласно схеме. Поверхность груза должна быть разровнена (рис. 7). Загрузка контейнера производится через открытый верх контейнера. После размещения груза в контейнере производится разравнивание штабеля, а при необходимости – его уплотнение. Общая масса груза в контейнере с учетом массы используемых материалов не должна превышать 32,27 т.

Сегодня для зарубежных грузополучателей перевозка угля в контейнерах типа Open top имеет ряд весомых преимуществ:

1. Сокращает простои вагонов на пограничных станциях в зимний период времени, так как смерзшийся уголь не перегружается из российского подвижного состава в китайский, контейнер сразу переставляют с платформы на платформу либо размещают их для кратковременного хранения на контейнерной площадке, в связи с чем ускоряется оборот грузовых вагонов, задействованных в перевозке.

2. Согласно тарифу, отправка угля в контейнерах для грузоотправителя дороже по сравнению с полувагонами, но на пограничных переходах груз в таких контейнерах приходит быстрее по сравнению с полувагонами.

3. Сервис выгоден для грузоотправителей

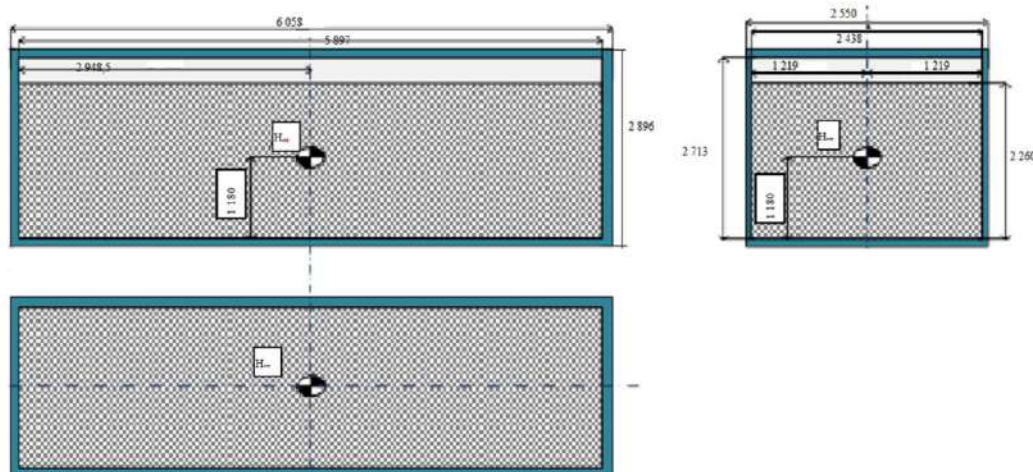


Рис. 7. Схема размещения и крепления насыпного груза в двадцатифутовом грузовом контейнере для сыпучих грузов без давления типа Open top

Fig. 7. Scheme of placement and fastening of bulk cargo in a 20-foot cargo container for bulk cargo without pressure Open top type

в перевозке угля в Open top в КНР за счет загрузки этих контейнеров в обратном направлении товарами народного потребления, запчастями, химической продукцией и т.д. Данная технология помогает параллельному импорту, так необходимо сегодня.

Как и любой процесс, контейнерная перевозка угля имеет некоторые недостатки:

– дефицит специализированных контейнеров, спредеров опрокидывающего типа для выгрузки груза из контейнера;

– открытие железнодорожных станций по параграфу для операций с контейнерами и, соответственно, приобретение погрузочной техники на грузовых дворах;

– при перевозке угля в контейнерах типа Open top теряется общий вес отправок.

Учитывая преимущества и недостатки перевозки угля в специализированных контейнерах, можно сделать вывод, что в новых экономических условиях перевозка насыпных и навалочных грузов в контейнерах данного типа будет только увеличиваться, но для этого необходим парк, устранение всех технологических ограничений и поддержка государства [18, 19].

Экономическое обоснование эффективности перевозок угля в контейнерах типа Open top на производственном участке Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом (ст. Касьяновка)

На ст. Касьяновка грузовые операции осуществляются на железнодорожном пути необщего пользования ООО «Разрез Черемховуголь», а также на железнодорожном пути общего пользования № 33 силами и средствами ВС ДМ ОАО «РЖД».

По итогам 2023 г. с железнодорожного пути необщего пользования ООО «Разрез Черемховуголь» отправлено 23 511 вагонов (1 474,4 тыс. т) груза – уголь каменный, тальк молотый, что составляет 82 % от общего объема погрузки по ст. Касьяновка. На железнодорожном пути общего пользования № 33 (грузовой двор) погружено углем 4 396 вагонов (484,3 тыс. т) такими грузоотправителями, как ООО «АТЭК», ООО «КОУЛЭКСПО», ООО «Разрез Иретский», ООО «СТС-Уголь», ООО «Уголь Восточной Сибири», ООО «Энерготранс плюс».

Основными направлениями отправки

угольной продукции со ст. Касьяновка являются следующие дороги: Восточно-Сибирская, Дальневосточная, Забайкальская, ООО «Рубикон» ст. Михайло-Семеновская (рис. 8). Проанализирована динамика погрузки угля на ст. Касьяновка за три года (рис. 9). Видно, что погрузка угля на ст. Касьяновка имеет нисходящий тренд. Погрузка в 2023 г. составила 82 % к уровню 2022 г. (– 18 %) и 70 % к уровню 2021 г. (–30 %). За 2023 г. из общего объема погрузки угля на ст. Касьяновка 25 % отправлено на экспорт в Китай, что в абсолютных значениях составляет 606,6 тыс. т. Данная структура перевозок представлена на рис. 10.

Основной причиной снижения объемов погрузки стало систематическое отклонение заявок на перевозку угольной продукции формы ГУ-12.

Главной задачей производственного участка на ст. Касьяновка является организация погрузки угольной продукции в рамках Соглашения ОАО «РЖД» с правительством Иркутской области по гарантированному вывозу угольной продукции от производителей региона.

Для решения данной задачи предлагается контейнеризировать погрузку угольной продукции и тем самым обеспечить прирост погрузки к уровню 2023 г. с отправкой запланированных объемов навалочных грузов в составе контейнерных поездов, состоящих из контейнеров типа Open top [19, 20].

Для организации перевозок угля в контейнерах, а также увеличения доходности ТЛББ авторами предлагается произвести открытие ст. Касьяновка для осуществления грузовых операций по параграфу 8 – прием и выдача грузов в крупнотоннажных двадцатифутовых контейнерах массой брутто 20 и 24 т на станциях и по параграфу 10 – прием и выдача грузов в крупнотоннажных контейнерах массой брутто 24 и 30 т на станциях.

Для работы с крупнотоннажными контейнерами предлагается на грузовом дворе ст. Касьяновка оборудовать контейнерную площадку в пределах железнодорожного пути № 33, разработать технологию погрузки угля в контейнеры типа Open top по принципу погрузки в полувагоны (без снятия контейнеров с платформ).

Ожидаемый объем по переработке контейнеров можно рассчитать исходя из упущенных объемов по итогам работы в 2023 г. в связи

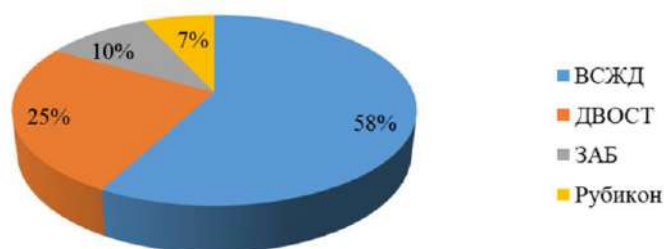


Рис. 8. Корреспонденция перевозок угольной продукции со ст. Касьяновка
Fig. 8. Correspondence of transportation of coal products from the Kas'yanovka station

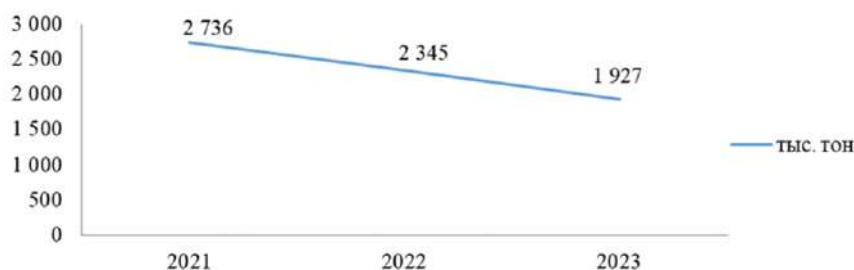


Рис. 9. Корреспонденция перевозок угольной продукции со ст. Касьяновка в 2021–2023 гг.
Fig. 9. Correspondence of transportation of coal products from the station Kasyanovka in the 2021–2023

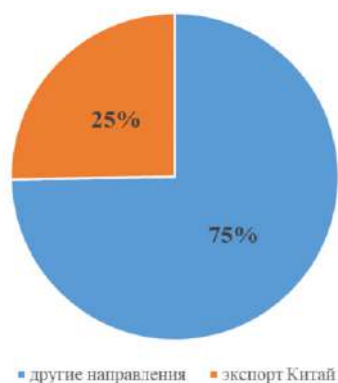


Рис. 10. Объем перевозки угля, в том числе экспорт в Китай, в 2023 г.
Fig. 10. The volume of coal transportation, including exports to China, in 2023

с несогласованием заявок формы ГУ-12. Отставание по погрузке к уровню 2022 г. составило 100,4 тыс. т. При загрузке одного контейнера Open top 32 т общий объем контейнеров составит 3 137 ДФЭ в год или 261 ДФЭ в месяц.

Характеристики для формирования контейнерного поезда на железнодорожных путях общего пользования ст. Касьяновка:

1. Длина – 71 условный вагон (длина фитинговых платформ по осям автосцепок для перевозки крупнотоннажных контейнеров принята 25,48 м).

2. Перевозка будет осуществляться в двадцатифутовых крупнотоннажных контейнерах Open top (два контейнера на вагоне).

3. Погрузка контейнеров на вагоны будет

осуществляется на пути № 33 грузового двора ст. Касьяновка. Учитывая длину грузового фронта (126 м), количество одновременно загружаемых вагонов составит пять платформ по два контейнера на каждой.

Необходимо отметить, что будет иметься резерв по увеличению длины грузового фронта с учетом полезной длины пути № 33 – 400 м и вместимость в условных вагонах с учетом длины локомотива 16 вагонов может составлять 15 фитинговых платформ по два контейнера на каждой.

Расчет контейнеризации угля в контейнерах Open top в составе контейнерных поездов представлен в табл. 2.

При погрузке угля в контейнеры типа Open

тор на производственном участке ВС ДМ ОАО «РЖД» ст. Касьяновка и отправка груза в контейнерах возможна по одному из двух вариантов.

1. Групповыми контейнерными отправлениями (пять вагонов с учетом длины грузового фронта). Расчет экономического эффекта для ОАО «РЖД» представлен в табл. 3.

2. Контейнерными поездами с формированием поезда на железнодорожных путях общего пользования. Расчет экономического эффекта для ОАО «РЖД» представлен в табл. 4.

Проведен сравнительный анализ стоимости перевозки угля железнодорожным транспортом со ст. Касьяновка до ст. Забайкальск при осуществлении погрузки силами ВС ДМ ОАО «РЖД».

Вариант 1. Погрузка угля в полувагоны грузоподъемностью 70 т с отправкой груза группами по десять вагонов:

– стоимость одной тонно-операции по погрузке угля силами ДМ – 96 руб.;

– партия груза из десяти полувагонов – 700 т;

– стоимость работ ДМ по погрузке десяти вагонов составит 67 200 руб.;

– тариф за перевозку десяти полувагонов с углем – 661 370 руб.

Таким образом, стоимость перевозки 700 т угля в полувагоне составит 728 570 руб. Перевозка 1 т груза по данному варианту – 1 040,8 руб.

Вариант 2. Погрузка угля в полувагоны грузоподъемностью 70 т с отправкой груза маршрутом 69 вагонов:

– стоимость одной тонно-операции по погрузке угля силами ДМ – 96 руб.;

– партия груза из 69 полувагонов – 4 830 т;

– стоимость работ ДМ по погрузке 69 вагонов составит 463 680 руб.;

– тариф за перевозку 69 полувагонов с углем – 4 530 471 руб.

Таким образом, стоимость перевозки 4 830 т угля в полувагоне составит 4 994 151 руб. Перевозка 1 т груза по данному варианту – 1 033,9 руб.

Вариант 3. Погрузка угля в контейнеры типа Open top грузоподъемностью 32 т с отправкой груза группами по пять вагонов:

– стоимость переработки одного контейнера силами ДМ – 1 879 руб.;

– партия груза из десяти контейнеров – 320 т;

– стоимость работ ДМ по погрузке десяти контейнеров составит 18 790 руб.;

– провозная плата за перевозку десяти контейнеров с углем – 435 776 руб.

Таким образом, стоимость перевозки 320 т угля в контейнерах составит 454 566 руб. Перевозка 1 т груза по данному варианту – 1 420,5 руб.

Вариант 4. Погрузка угля в контейнеры типа Open top грузоподъемностью 32 т с отправкой груза в составе контейнерного поезда по 55 вагонов:

– стоимость переработки одного контейнера силами ДМ – 1 879 руб.;

– контейнерный поезд из 110 контейнеров – 3 520 т;

– стоимость работ ДМ по погрузке 110 контейнеров составит 206 690 руб.;

– услуга по формированию контейнерного поезда на путях общего пользования – 78 323 руб.;

– стоимость услуги за согласованное отправление и прибытие грузов в контейнерах на станцию назначения – 53 025 руб.;

– провозная плата за перевозку одного контейнерного поезда с углем – 3 391 852 руб.

Таким образом, стоимость перевозки 3 520 т угля в контейнерах составит 3 729 890 руб. Перевозка 1 т груза по данному варианту – 1 059,6 руб.

Итоги проведенного авторами анализа по рассмотрению четырех вариантов перевозки угля железнодорожным транспортом из расчета стоимости перевозки 1 т груза представлены на рис. 11.

В соответствии с предложенными авторами технологиями можно сделать вывод, что при повагонной отправке стоимость перевозки 1 т угля в контейнерах типа Open top на 379,7 руб. дороже, чем при перевозке угля в полувагоне. Таким образом, за перевозку поезда весом в 4 830 т при контейнерной отправке дополнительный доход компании ОАО «РЖД» составит 1,8 млн руб. в виде железнодорожного тарифа.

При отправлении указанных объемов маршрутами стоимость перевозки 1 т угля в контейнерном поезде на 25 руб. дороже, чем в полувагоне. В итоге, при отправке угля в составе контейнерного поезда разница в стоимости перевозки маршрута 4 830 т составит 120,75 тыс. руб. [19, 21].

Кроме того, контейнеризация перевозок угля позволит восполнить отстающие объемы

Таблица 2. Расчет максимального количества контейнерных поездов для отправки угля в контейнерах типа Open top

Table 2. Calculation of the maximum number of container trains for shipping coal in Open top containers

Наименование Name	Единицы измерения Units of measurement	Величина Value
Общий объем контейнеров в год Total container volume per year	ДФЭ TFE	3 137
Объем переработки контейнеров в месяц Container processing volume per month	ДФЭ TFE	261
Состав контейнерного поезда Container train composition	физ. ваг. physical wagons	55
Количество контейнеров в поезде Number of containers per train	конт. cont.	110
Всего контейнерных поездов в месяц Total container trains per month	поездов (шт.) trains (pieces)	2
Всего контейнерных поездов в год Total container trains per year	поездов (шт.) trains (pieces)	24

Таблица 3. Расчет экономического эффекта для ОАО «РЖД» при погрузке угля в контейнеры Open top и отправлении группой 5 вагонов по маршруту Касьяновка – Забайкальск

Table 3. Calculation of the economic effect for JSC Russian Railways when loading coal into Open top containers and sending it in a group of 5 wagons along the Kasyanovka – Zabaikal'sk route

Показатель Indicator	Единицы измерения Units of measurement	Величина Value
Переработка контейнеров на грузовом дворе (обеспечение погрузки) Container handling at the cargo yard (ensuring loading)	руб./конт.	1 879
Общее количество контейнеров Total number of containers	шт.	10
Сумма погрузочных работ силами ДМ The amount of loading work by DM	руб.	18 790
Тариф за перевозку десяти контейнеров Tariff for transportation of ten containers	руб.	435 776
Итоговый доход ОАО «РЖД» Total income of JSC Russian Railways	руб.	454 566

Таблица 4. Расчет экономического эффекта для ОАО «РЖД» при погрузке угля в контейнеры Open top и отправлении в составе контейнерного поезда (55 вагонов) по маршруту Касьяновка – Забайкальск

Table 4. Calculation of the economic effect for JSC Russian Railways when loading coal into Open top containers and sending it as part of a container train (55 wagons) on the route Kasyanovka – Zabaikal'sk

Показатель Indicator	Единицы измерения Units of measurement	Величина Value
Переработка контейнеров на грузовом дворе (обеспечение погрузки) Container handling at the cargo yard (ensuring loading)	руб./конт.	1 879
Общее количество контейнеров Total number of containers	шт	110
Сумма погрузочных работ силами ДМ The amount of loading work by DM	руб.	206 690
Формирование контейнерного поезда на путях общего пользования Formation of a container train on public tracks	руб.	78 323
Сбор за нитку графика Fee for the schedule thread	руб.	53 025
Тариф за перевозку одного контейнерного поезда Tariff for transportation of one container train	руб.	3 391 852
Итоговый доход ОАО «РЖД» Total income of JSC «Russian Railways»	руб.	3 729 890

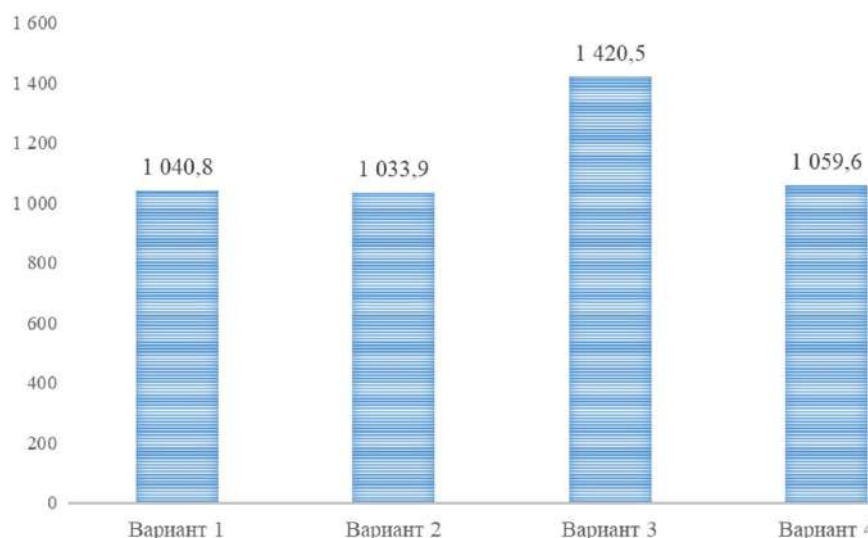


Рис. 11. Стоимость перевозки одной тонны угля железнодорожным транспортом в зависимости от вида отправки груза

Fig. 11. The cost of transporting one ton of coal by rail, depending on the type of shipment

по погрузке грузов на производственном участке ст. Касьяновка силами ДМ и получить дополнительные доходы от переработки грузов.

Однако при расчете за основу взяты ставки за услуги ВС ДМ ОАО «РЖД», утвержденные ЦМ, размещенные на официальном сайте ОАО «РЖД» в разделе «грузовые перевозки». При этом стоимость тонно-операции при погрузке навалочных грузов составляет 96 руб., а стоимость по переработке одного контейнера – 1 879 руб. При расчете на один контейнер 32 т, стоимость по погрузке угля в контейнер составляет 58,7 руб., что на 37,2 руб. меньше при погрузке данного груза в полувагон. Таким образом, при работе ВС ДМ с контейнерами типа Open top необходимо рассчитать калькуляцию затрат по погрузке угля на производственном участке ст. Касьяновка.

Заключение

После полного изучения производственно-хозяйственной деятельности работы ТЛББ холдинга ОАО «РЖД» отмечаем, что контейнеризация – ключ к созданию эффективных, конкурентоспособных и инновационных транспортно-технологических систем перевозки навалочных грузов, существенно повышающих сохранность качества и количества перевозимого

товара, экологическую безопасность транспортировки. Технико-экономическая эффективность перевозки для грузоотправителей будет определяться беспрепятственным пропуском грузов в контейнерах в период постоянно действующих ограничений на сухопутных пограничных переходах с Китайской Народной Республикой, снижением стоимости работ при перевалке груза за счет сокращения грузовых операций с грузом, обеспечением доставки непосредственно до потребителя без его складской переработки (перегрузки), значительным сокращением срока доставки угля за счет маршрутизации отправок в составе контейнерных поездов.

Перевозка угля в контейнерах снижает нагрузку на инфраструктуру, а также сокращает время в пути за счет уменьшения числа технических операций с вагонами. Поскольку при такой технологии не требуется перевалка груза на приграничных станциях в подвижной состав узкой колеи, нет и проблемы смерзшегося угля, из-за которой в холодное время года вагоны простаивают по несколько суток.

В результате можно отметить, что контейнеры Open top являются аналогами полувагонов и особенно перспективны в смешанном сообщении, что является их главным преимуществом.

Список литературы

1. Российские железные дороги // ОАО «РЖД»: сайт. URL : <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 30.08.2024).
2. Цифровизация // Gudok.ru : сайт. URL : <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1667772&archive=2024.04.25> (Дата обращения 29.08.2024).

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. Волкова Е.М., Малахова Е.А. Анализ основных бизнес-процессов и технологий передачи информации в транспортно-логистической компании // V Бетанкуровский междунар. инженер. форум : сб. тр. СПб., 2023. Т. 1. С. 181–186.
5. Бескровная В.К. Концепция создания терминально-логистических центров (ТЛЦ) на сети ОАО «РЖД» // Тр. 80-й студен. науч.-практ. конф. РГУПС. Воронеж, 2021. Ч. 2. С. 23–25.
6. Центр фирменного транспортного обслуживания – филиал ОАО «РЖД» (ЦФТО) // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=61#enttab-main> (Дата обращения 29.08.2024).
7. Динец Д.А., Коногопов М.В. Международные транспортные коридоры: перспективы для России // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. Т. 2. С. 48–53.
8. Восточно-Сибирский территориальный центр фирменного транспортного обслуживания / ОАО «РЖД» : сайт. URL : <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=1742> (Дата обращения 29.08.2024).
9. Власова Н.В., Оленевич 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.
10. Григорьев И.М. Концепция создания терминально-логистических центров на сети ОАО «РЖД» // Тр. 81-й студен. науч.-практ. конф. РГУПС. Воронеж, 2022. Ч. 1. С. 22–24.
11. Власова Н.В., Оленевич В.А. Декомпозиция основных бизнес-процессов и зоны формирования рисков железнодорожной транспортной системы в сфере грузовых перевозок // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 4 (63). С. 44–52.
12. Рыжкова А.Ю., Угловская Д.Д. Контейнеризация как основной драйвер развития грузовых перевозок в России // Проблемы управления – 2021 : материалы 29-й Всерос. студен. конф. М., 2021. С. 202–205.
13. Мехедов М.И. Современные вызовы и барьеры для контейнеризации грузовых перевозок // Наука 1520 ВНИИЖТ : Загляни за горизонт : материалы II Междунар. конф. М., 2023. С. 177–182.
14. Рабазанова А.А. Контейнеризация как перспективное направление развития грузовых перевозок // Научные исследования: фундаментальные и прикладные аспекты – 2023 : сб. ст. Казань, 2023. Вып. 1. С. 68–75.
15. Песеровская Е.Д., Ким А.С. Услуга «Грузовой экспресс» как способ повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 2 (53). С. 37–45.
16. Гладунов В.А., Бондаренко Е.М. Оценка экономических затрат грузоотправителей на перевозку угля из России в Китай по схеме «железная дорога – река – море» в сравнении с традиционными цепями поставок // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2024. № 2 (69). С. 5–12.
17. Фролова А.М. Сравнение вариантов перевозки угля в контейнерах и полувагонах // Дни науки – 2023 : материалы регион. форума. Новосибирск, 2023. С. 38–41.
18. Антонова А.В., Власова Н.В. Инновационные методы перевозки и технология погрузки навалочных грузов в крупнотоннажные контейнеры типа «OPEN TOP» // Молодая наука Сибири. 2021. № 4 (14). С. 17–22. URL : <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/297/219> (дата обращения 18.04.2024).
19. Центральная дирекция по управлению терминально-складским комплексом – филиал ОАО «РЖД» (ЦДМ) // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <https://cargo.rzd.ru/ru/9774> (Дата обращения 29.08.2024).
20. Попова Е.А., Журавлева И.В. Повышение уровня контейнеризации за счет использования контейнеров «OPEN-TOP» // Транспорт: наука, образование, производство : тр. междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2022. С. 207–210.
21. Царегородцева Е.Ю., Власова Н.В. Взаимодействия логистических центров с различными видами транспорта при организации контейнерных перевозок // Экономика железных дорог. 2024. № 8. С. 49–55.

References

1. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed August 30, 2024).
2. Tsifrovizatsiya (Elektronnyi resurs) [Digitalization (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1667772&archive=2024.04.25> (Accessed August 29, 2024).
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. Volkova E.M., Malakhova E.A. Analiz osnovnykh biznes-protsessov i tekhnologii peredachi informatsii v transportno-logisticheskoi kompanii [Analysis of the main business processes and information transfer technologies in a transport and logistics company]. *Sbornik trudov v dvukh tomakh «V Betankurovskii mezhduнародnyi inzhenernyi forum»* [Proceedings in 2 volumes «V Betancourt International Engineering Forum»]. Saint Petersburg, 2023, vol. 1, pp. 181–186.
5. Beskrovnaya V.K. Kontseptsiya sozdaniya terminal'no-logisticheskikh tsentrov (TLTs) na seti ОАО «RZhD» [The concept of creating terminal and logistics centers (TLC) on the network of JSC «Russian Railways»]. *Trudy 80-i studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii RGUPS* [Proceedings of the 80th student scientific and practical conference of the Rostov State Transport University]. Voronezh, 2021, part 2, pp. 23–25.
6. Tsentr firmennogo transportnogo obsluzhivaniya – filial ОАО «RZhD» (TsFTO) (Elektronnyi resurs) [Center for branded transport services – a branch of JSC «Russian Railways» (CBTS) (Electronic resource)]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=61#enttab-main> (Accessed August 29, 2024).

7. Dinets D.A., Konotopov M.V. Mezhdunarodnye transportnye koridory: perspektivy dlya Rossii [International transport corridors: prospects for Russia]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, vol. 2, pp. 48–53.
8. Vostochno-Sibirskii territorial'nyi tsentr firmennogo transportnogo obsluzhivaniya [East Siberian territorial center of corporate transport services (Electronic resource)]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=1742> (Accessed August 29, 2024).
9. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Sovershenstvovanie protsessov transportno-logisticheskogo biznes-bloka po realizatsii proekta predostavleniya 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.
10. Grigor'ev I.M. Kontseptsiya sozdaniya terminal'no-logisticheskikh tsentrov na seti OAO «RZhD» [The concept of creating terminal and logistics centers on the network of JSC «Russian Railways»]. *Trudy 81-i studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii RGUPS* [Proceedings of the 81-st student scientific and practical conference of the Rostov State Transport University]. Voronezh, 2022, part 1, pp. 22–24.
11. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Dekompozitsiya osnovnykh biznes-protsessov i zony formirovaniya riskov zheleznodorozhnoi transportnoi sistemy v sfere gruzovykh perevozok [Decomposition of the main business processes and the risk formation zone of the railway transport system in the field of freight transportation]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2022, no. 4 (63), pp. 44–52.
12. Ryzhkova A.Yu., Uglovskaya D.D. Konteinerizatsiya kak osnovnoi draiver razvitiya gruzovykh perevozok v Rossii [Containerization as the main driver of the development of freight transportation in Russia]. *Materialy 29-i Vserossiiskoi studencheskoi konferentsii «Problemy upravleniya – 2021»* [Proceedings of the 29th All-Russian student conference «Management problems – 2021»]. Moscow, 2021, pp. 202–205.
13. Mekhedov M.I. Sovremennye vyzovy i bar'ery dlya konteinerizatsii gruzovykh perevozok [Modern challenges and barriers to containerization of freight transportation]. *Materialy II Mezhdunarodnoi konferentsii «Nauka 1520 VNIIZhT : Zaglyani za gorizont»* [Proceedings of the II International Conference «Science 1520 VNIIZhT : Look beyond the horizon»]. Moscow, 2023, pp. 177–182.
14. Rabazanova A.A. Konteinerizatsiya kak perspektivnoe napravlenie razvitiya gruzovykh perevozok [Containerization as a promising direction for the development of freight transportation]. *Sbornik statei «Nauchnye issledovaniya: fundamental'nye i prikladnye aspekty – 2023»* [Scientific research: fundamental and applied aspects – 2023]. Kazan', 2023, iss. 1, pp. 68–75.
15. Pserovskaya E.D., Kim A.S. Usluga «Gruzovoi ekspress» kak sposob povysheniya konkurentosposobnosti zheleznodorozhnogo transporta [The «Freight Express» service as a way to increase the competitiveness of railway transport]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2020, no. 2 (53), pp. 37–45.
16. Gladunov V.A., Bondarenko E.M. Otsenka ekonomicheskikh zatrat gruzootpravitelei na perevozku uglya iz Rossii v Kitai po skheme «zheleznyaya doroga – reka – more» v sravnenii s traditsionnymi tsepyami postavok [Assessment of the economic costs of shippers for the transportation of coal from Russia to China using the «railway – river – sea» scheme in comparison with traditional supply chains]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2024, no. 2 (69), pp. 5–12.
17. Frolova A.M. Sravnenie variantov perevozki uglya v konteinerakh i poluvagonakh [Comparison of options for transporting coal in containers and gondola wagons]. *Materialy Regional'nogo foruma «Dni nauki – 2023»* [Materials of the Regional Forum «Days of Science – 2023»]. Novosibirsk, 2023, pp. 38–41.
18. Antonova A.V., Vlasova N.V. Innovatsionnye metody perevozki i tekhnologiya pogruzki navalochnykh gruzov v krupnotonazhnye konteinery tipa «OPEN TOP» [Innovative methods of transportation and technology for loading bulk cargo into large-capacity containers of the «OPEN TOP» type]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no. 4 (14), pp. 17–22.
19. Tsentral'naya direktsiya po upravleniyu terminal'no-skladskim kompleksom – filial OAO «RZhD» (TsM) (Elektronnyi resurs) [Central Directorate for Management of the Terminal and Warehouse Complex – Branch of JSC Russian Railways (TsM) (Electronic resource)]. Available at: <https://cargo.rzd.ru/ru/9774> (Accessed August 29, 2024).
20. Popova E.A., Zhuravleva I.V. Povyshenie urovnya konteinerizatsii za schet ispol'zovaniya konteinerov «OPEN-TOP» [Increasing the level of containerization through the use of «OPEN-TOP» containers]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Transport: science, education, production»]. Voronezh, 2022, pp. 207–210.
21. Tsaregorodtseva E.Yu., Vlasova N.V. Vzaimodeistviya logisticheskikh tsentrov s razlichnymi vidami transporta pri organizatsii konteinerovykh perevozok [Interaction of logistics centers with various modes of transport when organizing container transportation]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economics of railways], 2024, no. 8, pp. 49–55.

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.

Брытков Владимир Сергеевич, аспирант кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: vladimir-brytkov99@yandex.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.

Vladimir S. Brytkov, Ph.D. Student of the Department of Operation Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: vladimirbrytkov99@yandex.ru.

Вопросы повышения эффективности системы таможенного контроля железнодорожного пункта пропуска

Т.А. Булохова, В.А. Оленцевич✉

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

✉olencevich_va@mail.ru

Резюме

Основой повышения эффективности дальнейшего развития транспортно-логистической системы страны является Транспортная стратегия Российской Федерации. Разработка данного документа учитывала ряд факторов: результаты глубокого анализа и диагностики проблем функционирования транспортного комплекса и входящих в его состав структурных подразделений; прогнозные значения спроса на грузовые перевозки в соответствии с текущей политической и экономической ситуацией, их возможные колебания, географическую нестабильность; преобразования сфер транспортного рынка; изменения систем таможенного контроля и пограничных пунктов пропуска; условия экономического развития государства и его регионов; оценку роли российской транспортной системы в мировом сообществе. При этом в качестве важнейшего показателя дальнейшего эффективного функционирования железнодорожной транспортной системы страны необходимо учитывать размеры пропускных и перерабатывающих способностей объектов инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД», особенно в существующих условиях значительных преобразований мирового транспортного рынка, разворота грузопотока на восточное направление, ускоренного развития торговых отношений с Азиатско-Тихоокеанскими государствами. В данных условиях вопросы повышения эффективности системы таможенного контроля пограничных пунктов пропуска Россия – Китай – Монголия встают особенно остро, поскольку технологические, организационные и управленческие операции, осуществляемые в пунктах пограничных переходов в полной мере оказывают влияние на эффективность организации перевозочного процесса на Восточном полигоне железных дорог, возможность обеспечения высокого уровня пропускных и перерабатывающих мощностей объектов железнодорожного транспортного комплекса, реализацию пропуска заданных размеров поездопотоков.

Ключевые слова

транспортно-логистическая система, Восточный полигон железных дорог, поездопоток, таможенный контроль, пограничный пункт пропуска, объекты инфраструктурного комплекса, уровень пропускных и перерабатывающих мощностей, стационарный инспекционно-досмотровый комплекс, мультипликативный эффект

Для цитирования

Булохова Т.А. Вопросы повышения эффективности системы таможенного контроля железнодорожного пункта пропуска / Т.А. Булохова, В.А. Оленцевич // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 107–118. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).107-118.

Информация о статье

поступила в редакцию: 02.09.2024 г.; поступила после рецензирования: 09.09.2024 г.; принята к публикации: 12.09.2024 г.

Issues of improving the effectiveness of the customs control system of the railway checkpoint

Т.А. Bulokhova, V.A. Olentsevich✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉olencevich_va@mail.ru

Abstract

The basis for improving the efficiency of further development of the country's transport and logistics system is the Transport Strategy of the Russian Federation. The development of this document took into account a number of factors: the results of an in-depth analysis and diagnosis of the problems of the functioning of the transport complex and its constituent structural units; forecast values of demand for freight transportation in accordance with the current political and economic situation, their possible fluctuations, geographical instability; transformations of the spheres of the transport market; changes in customs control systems and border checkpoints; conditions of economic development of the state and its regions; assessment of the role of the Russian transport system in the world community. At the same time, as the most important indicator of the further effective functioning of the country's railway transport system, it is necessary to take into account the size of the throughput and processing capacities of the facilities of the Russian Railways infrastructure complex, especially in the current conditions of significant transformations of the global transport market, the reversal of freight traffic to the eastern direction, the accelerated development of trade relations with Asia-Pacific states. In these conditions, the issues of improving the effectiveness of the customs control system at the Russia

– China–Mongolia border checkpoints are particularly acute, since technological, organizational and managerial operations carried out at border crossing points fully affect the efficiency of the organization of the transportation process at the Eastern Railway polygon, the possibility of ensuring a high level of throughput and processing capacities of railway facilities transport complex and implementation of the passage of specified amounts of train flows.

Keywords

transport and logistics system, Eastern railway polygon, train traffic, customs control, border checkpoint, infrastructure facilities, level of throughput and processing capacities, stationary inspection and screening complex, multiplicative effect

For citation

Bulokhova T.A., Olentsevich V.A. Voprosy povysheniya effektivnosti sistemy tamozhennogo kontrolya zheleznodorozhnogo punkta propuska [Issues of improving the effectiveness of the customs control system of the railway checkpoint]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 107–118. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).107-118.

Article Info

Received: September 2, 2024; Revised: September 9, 2024; Accepted: September 12, 2024.

Введение

Уровень пропускных и перерабатывающих мощностей объектов инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД» является важнейшим показателем эффективности функционирования железнодорожной транспортной системы РФ. Глобальные изменения тенденций мирового транспортного рынка потребовали от ОАО «РЖД» скорейшего проведения политики, направленной на совершенствование и преобразование всех сфер железнодорожного транспортного сектора. Активное развитие торговых отношений со странами Азиатско-Тихоокеанского региона вызвали острейшую необходимость трансформации технологических и организационных процессов работы пунктов пограничных переходов, эффективность деятельности которых имеет прямое влияние как на показатели организации перевозочного процесса на Восточном полигоне железных дорог, так и на показатели в масштабах страны, включая внешнеэкономическую деятельность [1–3].

Авторами проведен факторный анализ работы железнодорожного пограничного перехода станции Н Восточно-Сибирской железной дороги, являющегося одним из приоритетных пунктов пропуска поездопотока Россия – Монголия – Китай, темпы роста которого отмечены статистическими параметрами работы дороги в последние годы [1, 4].

Решение вопросов повышения эффективности системы таможенного контроля железнодорожного пункта пропуска станции Н позволит нарастить пропускные и перерабатывающие мощности Восточного полигона, а также укрепит торгово-экономические связи с сопредельными государствами [5].

Целью исследования является совершенствование системы таможенного контроля железнодорожного пункта пропуска в рамках проведения реконструкционных мероприятий по железнодорожной станции Н с оценкой эффективности реализации представленного технического решения.

Предпосылки развития железнодорожного пункта пропуска

В связи со сложившейся политической и экономической ситуацией на мировой арене, бурным развитием экономики стран Азиатско-Тихоокеанского региона, ростом торгового оборота с Китаем, в России произошла переориентация грузовых потоков в направлении дальневосточных портов, пограничных переходов, о чем свидетельствуют темпы прироста грузооборота по стыковым железнодорожным станциям (рис. 1). Данная тенденция, безусловно, требует от железнодорожной транспортной системы наличия современного и мощного инфраструктурного комплекса, имеющего резервы по реализации перспективных пропускных и перерабатывающих мощностей [1, 6–9].

Как видно из рис. 1, объемы приема и сдачи грузов за последние три года по пограничному переходу железнодорожной станции Н имеют прирост практически в 50 раз. Данный погранпереход является одним из приоритетных пунктов пропуска, через который следует поток грузов по направлению Россия – Монголия, Россия – Китай. Техническое развитие железнодорожного пункта пропуска станции Н позволит нарастить пропускные мощности Восточного полигона, а также укрепит торгово-экономические связи с соседними государствами [9–12].

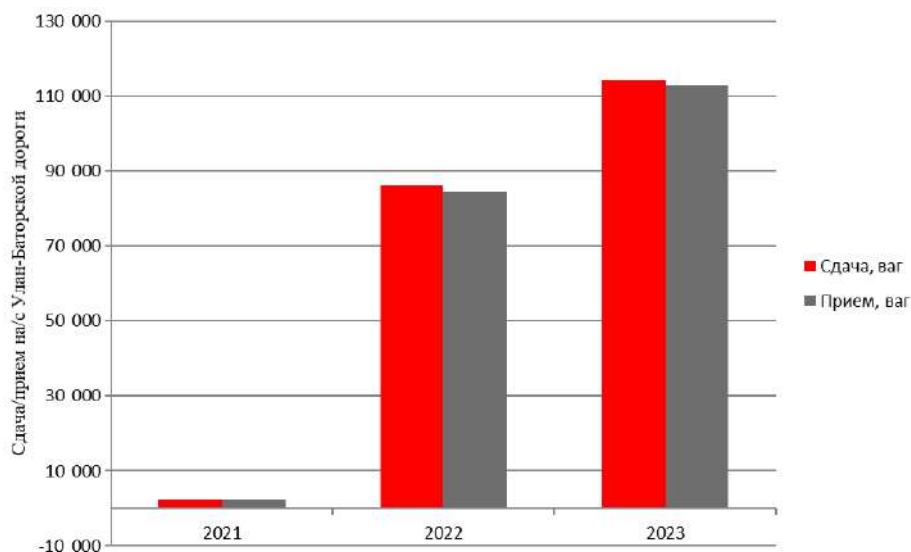


Рис. 1. Объемные показатели взаимодействия ОАО «РЖД» и Улан-Баторской железной дороги, ваг.
Fig. 1. Volumetric indicators of interaction between JSC Russian Railways and Ulaanbaatar Railway, wag.

Проведенный авторами структурный анализ показателя «время простоя грузового вагона по станции Н» позволил выяснить, что наибольший удельный вес приходится на время в ожидании освобождения грузового фронта – 45 %. На время ожидания, отнесенное на ответственность таможенных органов, приходится 20 % от общего непроизводительного времени простоя вагона, на ответственность Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом (ВС ДМ) – 12 %, на ответственность железнодорожной станции – 23 %. Подобная динамика сохраняется в те-

чение трех последних лет, что связано с установленной технологией работы таможенных органов пункта пропуска станции Н, занятостью подъездных путей ВС ДМ, а также низкой произвольностью маневровых средств и комплексов (рис. 2) [1, 7].

Качественный показатель «среднее время простоя грузовых поездов на инфраструктурном комплексе станции Н» за 2023–2024 гг. имеет следующую тенденцию:

– нечетный поездопоток от момента прибытия до срока отправления со станции простаивает в среднем 313 мин. (грузовой поезд),



Рис. 2. Структура времени простоя вагона на пограничном пункте пропуска
Fig. 2. Structure of wagon downtime at border checkpoint

что превышает плановое значение на 56,5 %;
– четный поездопоток – 493 мин. (грузовой поезд), что выше плана на 103 %.

Основные причины простоя четных и нечетных поездов на пункте пропуска с указанием величины превышения плановых значений представлены на рис. 3 [1, 7, 8].

Проведенный анализ показал, что рост времени простоя вагонов связан с ожиданием свободности грузового фронта, а также с несовершенством существующей системы таможенного контроля железнодорожного пункта пропуска станции Н.

С целью оптимизации работы системы таможенного контроля в транспортной системе России, для решения вопросов обеспечения безопасности при транспортировке грузов между государственными границами, предотвращения актов незаконного вмешательства и контрабанды запрещенных к ввозу/вывозу грузов, проведения

более качественного досмотра широкое применение получили инспекционно-досмотровые комплексы различных модификаций.

Заслуживает внимания опыт внедрения стационарного инспекционно-досмотрового комплекса на железнодорожных пунктах пропуска Западно-Сибирской железной дороги.

Повышение эффективности системы таможенного контроля железнодорожного пункта пропуска

Сегодня в практике проведения процедур таможенного оформления грузов и подвижного состава, а также таможенного контроля широкое применение на ряде пунктов таможенного контроля железнодорожного пропуска нашли инспекционно-досмотровые комплексы различных модификаций. Использование на практике данных цифровых комплексов позволяет значительно повысить эффективность производства

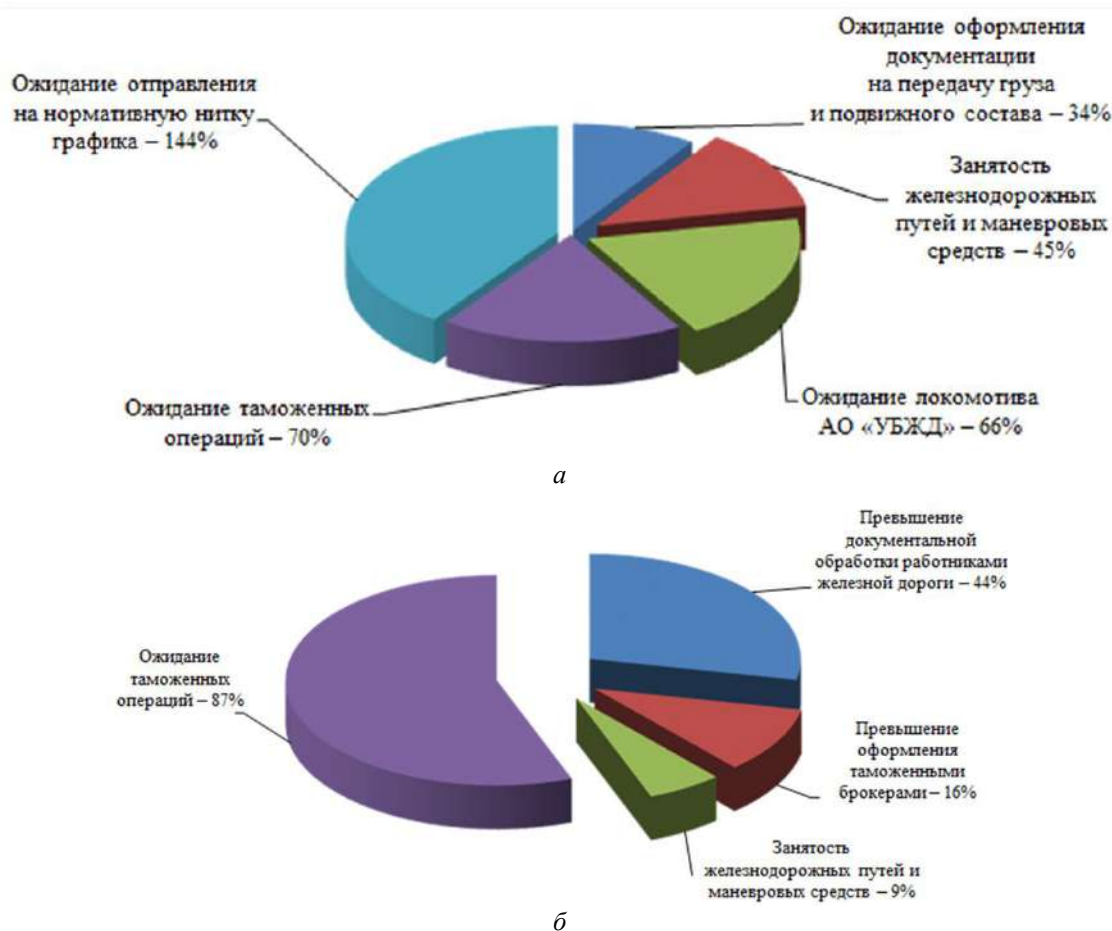


Рис. 3. Основные причины простоя грузовых поездов на пограничном пункте пропуска Н:
а – четный поездопоток; б – нечетный поездопоток

Fig. 3. Main reasons for freight train downtime at border checkpoint N:
a – even train flow; б – odd train flow

таких процедур таможенного контроля, как таможенный осмотр и досмотр грузов, а также подвижного состава различных геометрических и технических параметров.

Инспекционно-досмотровые комплексы предназначены также для интроскопии крупногабаритных объектов таможенного контроля, отличающихся значительными геометрическими и весовыми параметрами, составом конструктивных материалов, повышенной плотностью загрузки различными видами перевозимых в них грузов [15–18].

На железнодорожном пункте пропуска станции Н, согласно существующей технологии досмотра, крупногабаритные партии грузов вскрываются и досматриваются ручным способом. Данное действие является достаточно трудоемким и вызывает значительные простои поездов в ожидании окончания операций, снижая уровень пропускных и перерабатывающих мощностей объектов инфраструктурного комплекса пограничного пункта пропуска и прилегающих железнодорожных линий и направлений. Важным является тот факт, что процедура досмотра груза и подвижного состава производится выборочным и единичным способом, т.е. большая часть поездопотока пересекает российскую границу, проходя минимальные формы таможенного контроля, которые не предполагают вскрытия крупногабаритных объектов: проверка документов и сведений, устный опрос и визуальный таможенный осмотр. Это приводит к тому, что на

российских границах в пунктах пропуска достаточно часто фиксируются случаи нарушения таможенного законодательства [15, 17].

Использование инспекционно-досмотрового комплекса в системе таможенного контроля железнодорожного пункта пропуска станции Н позволит путем точного и эффективного сканирования за минимальное время без вскрытия и разгрузки подвижного состава получить его графическое изображение, полную характеристику внутреннего содержания и перевозимых в нем грузов, идентифицировать перевозимые товары и конструктивные узлы транспортных средств, обнаружить в них предметы, запрещенные к транспортировке по территории установленного государства, а также предоставит приблизительную оценку грузовой массы и количества перевозимых грузов [15–20]. Графическое изображение предлагаемого для внедрения в систему таможенного контроля железнодорожного пункта пропуска станции Н стационарного инспекционно-досмотрового комплекса представлено на рис. 4 [13, 14, 21].

Внедрение стационарного инспекционно-досмотрового комплекса позволит оптимизировать работу станции и, как следствие, будет способствовать снижению времени простоя вагонов.

Как основные показатели эффективности проектного решения по внедрению стационарного инспекционно-досмотрового комплекса на пункте пропуска станции Н целесообразно рассмотреть:

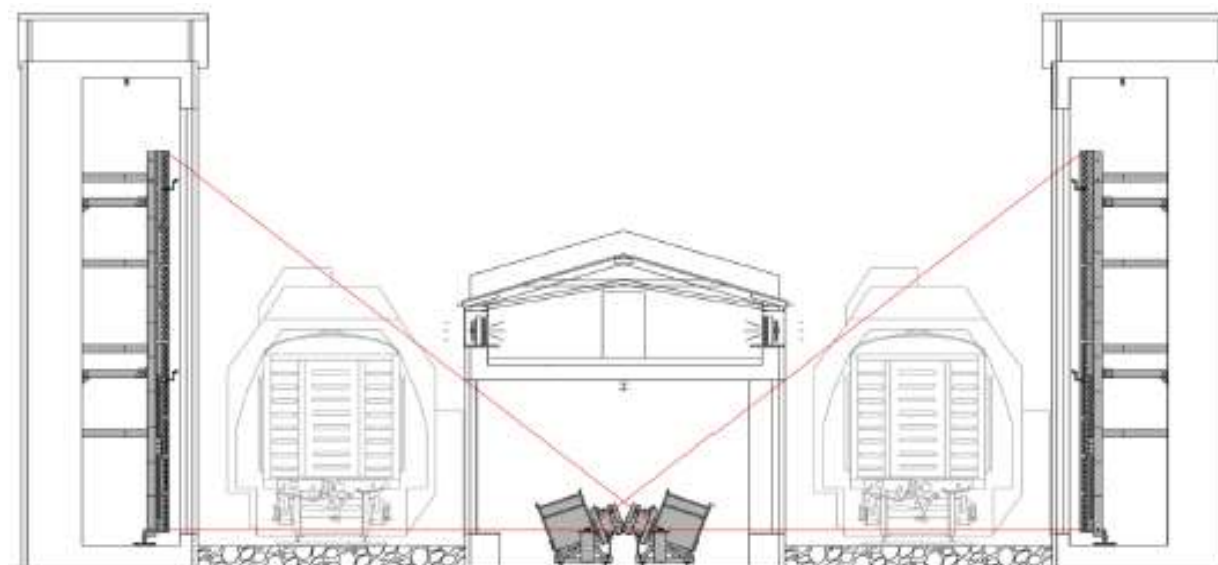


Рис. 4. Стационарный инспекционно-досмотровый комплекс
Fig. 4. Stationary inspection and inspection complex

– степень увеличения уровней пропускной и перерабатывающей способностей пункта пропуска железнодорожной станции Н и прилегающих железнодорожных линий;

– повышение производительности маневровых средств;

– сокращение времени простоя и неграфиковых задержек подвижного состава на пункте пропуска железнодорожной станции Н и прилегающих железнодорожных линиях [1, 21, 22].

Проект соответствует приоритетным направлениям инновационного и научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 г. (Белая книга), утвержденным распоряжением ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. № 769/р в части внедрения перспективных технических средств и технологий [1, 3, 21].

По результатам проведенного причинно-следственного анализа простоя вагонного парка сверх установленных технических норм и нормативов следует говорить о мультипликативном эффекте за счет внедрения стационарного инспекционно-досмотрового комплекса для дирекции терминально-складского комплекса, железнодорожной станции и таможенной службы.

Авторами составлена технологонормировочная карта процедуры таможенного досмотра железнодорожного пункта пропуска станции Н при существующей технологии работы и после установки стационарного инспекционно-досмотрового комплекса, позволяющая определить технические параметры работы системы для расчета мультипликативного эффекта (табл. 1).

Таблица 1. Технологонормировочная карта процедуры таможенного досмотра железнодорожного пункта пропуска станции Н

Table 1. Technological and standardization chart of the procedure for customs inspection of the railway check point of station N

Операции технологического процесса таможенного досмотра Operations of the technological process of customs inspection	Продолжительность операций, мин. Duration of operations, min.	
	Согласно существующей технологии работы According to the existing technology of work	После установки Досмотрового комплекса After installing the inspection complex
Прибытие состава на железнодорожную станцию Arrival of the train at the railway station	3–5	3–5
Осмотр прибывшего состава таможенными органами Inspection of the arriving train by customs authorities	120	5
Отцепка поездного локомотива Decoupling a train locomotive	15	15
Ожидание свободности грузового фронта Waiting for the cargo front to clear	90–13 820	90
Маневровые операции по подаче состава на железнодорожные подъездные пути станции Shunting operations for feeding a train to the station's railway sidings	90–2 016	90
Получение разрешения таможенных органов на выгрузку груза из вагонов Obtaining permission from customs authorities to unload cargo from wagons	15–360	15

Операции по выгрузке груза из вагонов силами работников железнодорожных подъездных путей станции Operations to unload cargo from wagons by employees of the railway sidings of the station	240–1 008	240
Выполнение сортировочных операций, определение массы груза и его герметических параметров, экспертиза представителями таможенных органов Carrying out sorting operations, determining the mass of cargo and its hermetic parameters, examination by customs officials	2 880	120
Получение разрешения таможенных органов на погрузку груза в вагоны Obtaining permission from customs authorities to load cargo into wagons	15–360	15
Операции по погрузке груза в вагоны силами работников железнодорожных подъездных путей станции Operations for loading cargo into wagons by employees of the railway sidings of the station	240–1 008	240
Маневровые операции по уборке состава с железнодорожных подъездных путей станции Shunting operations to remove the train from the station's railway sidings	90–2 016	90
Прицепка поездного локомотива Train locomotive coupling	15	15
Проследование состава через железнодорожную станцию Train passing through a railway station	–	–
Итого Total	от 2,6 сут. до 16,3 сут.	15,3 ч.

До внедрения стационарного инспекционно-досмотрового комплекса ожидание срока освобождения для производства операций выгрузки грузового фронта достигало в среднем от 8 ч до 11 сут., подача и уборка – до 2,8 сут., продолжительность таможенных операции – до 2,5 сут. Таким образом, суммарное время нахождения грузового вагона на железнодорожном пункте пропуска станции Н могло достигать 16,3 сут.

Прогнозные значения показателей работы системы таможенного контроля железнодорожного пункта пропуска станции Н с учетом внедрения стационарного инспекционно-досмотрового комплекса доказали, что продолжительность нахождения грузового вагона на пункте пропуска возможно сократить до 15,3 ч. При этом таможенному досмотру будет

подвержено от 50 до 70 % вагонов от отцепленных на текущее время в связи с тем, что по части вагонного парка будет принято управленческое решение о возможности их проследования, согласно результатам сканирования и анализа полученного графического изображения, что позволит повысить качество досмотра. Сокращение времени простоя подвижного состава в ожидании свободы грузового фронта и повышение эффективности работы маневровых средств позволят оптимизировать объемные и качественные показатели работы объектов инфраструктурного комплекса Восточного полигона железных дорог.

Прогнозные значения экономического эффекта от изменения технологии таможенного досмотра грузов представлены в табл. 2 [21, 22].

Таблица 2. Прогнозные значения экономического эффекта от изменения технологии таможенного досмотра
Table 2. Projected values of the economic effect of changes in customs inspection technology

Показатель для прогноза значений эффекта Indicator for predicting the effect values	Алгоритм расчета Calculation algorithm	Экономический эффект Economic effect
До внедрения мероприятия Before the measure implementation	Время после отцепки вагона до постановки в поезд · стоимость простоя · среднее количество отцепляемых вагонов в год Time after uncoupling a wagon before placing it on a train · cost of downtime · average number of uncoupled wagons per year	$392 \cdot 285 \cdot 450 =$ $= 50\,274,5$ тыс. руб. в год
После внедрения мероприятия After the measure implementation	Время после отцепки вагона до постановки в поезд · стоимость простоя · 50 % от среднего количества вагонов в год Time after uncoupling a wagon before placing it on a train · cost of downtime · 50% of the average number of wagons per year	$15 \cdot 285 \cdot (450/2) =$ $= 961,872$ тыс. руб. в год
Прогнозное значение экономического эффекта, вызванное сокращением времени простоя вагонов Forecasted value of the economic effect caused by the reduction of wagon downtime	Эксплуатационные расходы до – эксплуатационные расходы после Operating costs before – operating costs after	$50\,274,5 - 961,872 =$ $= 49\,312,125$ тыс. руб. в год
Прогнозное значение экономического эффекта от снижения времени простоя поезда по причине таможенных операций в четном и нечетном направлении Forecasted value of the economic effect from the reduction of train downtime due to customs operations in the even and odd directions	Время простоя поездов четного направления движения · годовое количество поездов четного направления · укрупненная расходная ставка поездо-час простоя поезда на инфраструктурном комплексе ОАО «РЖД» + время простоя поездов нечетного направления движения · годовое количество поездов нечетного направления · укрупненная расходная ставка поездо-час простоя поезда на инфраструктурном комплексе ОАО «РЖД» Downtime of trains in the even direction of travel · annual number of trains in the even direction · aggregated cost rate train-hour of train downtime on the infrastructure complex JSC «Russian Railways» + downtime of trains in the odd direction of travel · annual number of trains in the odd direction · consolidated cost rate per train-hour of train downtime on the infrastructure complex of JSC «Russian Railways»	$(16+78)/60 \cdot 1\,628 \cdot$ $\cdot 2\,572,26 + 70/60 \cdot 1\,612 \cdot$ $2\,572,26 = 11\,399,066$ тыс. руб. в год

<p>Мультипликативный экономический эффект Multiplicative economic effect</p>	<p>Прогнозное значение экономического эффекта, вызванное сокращением времени простоя вагонов + прогнозное значение экономического эффекта от снижения времени простоя поезда по причине таможенных операций в четном и нечетном направлении Forecast value of the economic effect caused by the reduction of wagon downtime + forecast value of the economic effect from the reduction of train downtime due to customs operations in even and odd directions</p>	<p>$49\,312,125 + 11\,399,066 = 60\,711,191$ тыс. руб. в год</p>
--	---	---

Согласно проведенным расчетам, величина мультипликативного экономического эффекта от изменения системы таможенного контроля железнодорожного пункта пропуска станции Н составит 60 711,191 тыс. руб. в год.

В расчете принята стоимость стационарно-инспекционно-досмотрового комплекса, которая, согласно представленному коммерческому предложению от ООО «Системы телекоммуникаций и безопасности», составляет 563 750,0 тыс. руб. за единицу (без учета НДС) [1, 22].

Объем внедрения стационарного инспекционно-досмотрового комплекса составляет 1 ед. при входе на территорию железнодорожной станции. Также при расчете учтено прогнозное изменение индекса цен производителей промышленных товаров в размере 105,5 % в соответствии с требованиями телеграфного указания Департамента экономики ОАО «РЖД» от 3 октября 2022 г. № ИСХ-23262 о сценарных условиях формирования бюджетов филиалов ОАО «РЖД» на 2023 г. [1, 22].

Общая стоимость затрат на приобретение стационарного инспекционно-досмотрового комплекса составит 594 756,250 тыс. руб. (без учета НДС и транспортной доставки).

Заключение

1. Реализация технического решения по внедрению стационарного инспекционно-досмотрового комплекса в систему таможенного контроля железнодорожного пункта пропуска станции Н позволит повысить пропускную способность Восточного полигона железных дорог на 1,82 %, предоставит возможности грузоотправителям в полном объеме осваивать заявки на отправление и транспортировку грузов, исключая все виды рисков.

2. Появится возможность прироста объемов грузоперевозок как у грузоотправителей, так и у ВС ДМ и прочих предприятий железнодорожной транспортной системы по причине повышения на 11,2 % перерабатывающих мощностей пунктов пропуска. В результате будет получен мультипликативный экономический эффект в размере 60 711,191 тыс. руб. в год.

3. Внедрение стационарного инспекционно-досмотрового комплекса позволит достичь экономического эффекта, который находит свое отражение в росте поступлений таможенных платежей в бюджет РФ и уменьшении числа преступлений при перемещении товаров и транспортных средств через границу.

Список литературы

1. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 29.08.2024).
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.-правов. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
3. С учетом требований времени нам нужны максимально быстрые решения // Гудок : сайт. URL : <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1637941&archive=2023.06.14> (Дата обращения 29.08.2024).
4. 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 28.08.2024).
5. «PRO//Движение» на Восток. Как эффективно организовать перевозки на Дальнем Востоке // Гудок : сайт. URL :

https://gudok.ru/content/forum_pro_dvizhenie/1669942/ (Дата обращения 29.08.2024).

6. Об утверждении плана «Трансформация делового климата» и признании утратившими силу актов Правительства РФ : распоряжение Правительства РФ от 17.01.2019 № 20-р (ред. 20.01.2024). Доступ из справ.-правов. системы КонсультантПлюс в локал. сети.

7. Власова А.Н., Белоголов Ю.И., Оленцевич В.А. Вопросы усиления пропускных мощностей объектов железнодорожного транспорта на восточном направлении // Управление социально-экономическим развитием регионов: проблемы и пути их решения : сб. ст. XIV Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2024. С. 89–92.

8. О применении отдельных специальных экономических мер в целях обеспечения безопасности Российской Федерации : Указ Президента РФ от 06.08.2014 № 560 (ред. от 18.09.2024). Доступ из справ.-правов. системы КонсультантПлюс в локал. сети.

9. Архит Б., Таюрская А., Оленцевич В. Информационные технологии электронного взаимодействия между Улан-Баторской железной дорогой и ОАО «РЖД» // Современные технологии, материалы и техника : сб. науч. ст. Всерос. науч.-техн. конф. Воронеж, 2023. С. 39–42.

10. Булохова Т.А., Перетолчина А.С. Уровень развития железнодорожной инфраструктуры как фактор обеспечения клиентоориентированности отрасли и устойчивого развития регионов // Развитие экономической науки на транспорте: экономическая основа будущего транспортных систем : сб. науч. ст. VII Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2019. С. 147–154.

11. Организационно-экономическая модель управления инновационным потенциалом Иркутской области / В.Н. Гордеев, В.Ю. Конохов, К.И. Новикова и др. Иркутск : ИрНИТУ, 2014. 91 с.

12. Динец Д.А., Конопов М.В. Международные транспортные коридоры: перспективы для России // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. Т. 2. С. 48–53.

13. Что такое ИДК – инспекционно-досмотровый комплекс // Modern way : сайт. URL : <https://mwlogistics.ru/blog/inspekcionno-dosmotrovyy-kompleks-idk-v-tamozhennom-dele> (Дата обращения 28.08.2024).

14. Улулов Ю.Г., Мячин Д.А., Черных В.А. Инспекционно-досмотровые комплексы: новые возможности таможенной службы России // Ученые записки Санкт-Петербургского им. В.Б. Бобкова филиала Российской таможенной академии. 2007. №3 (29). С. 49–60.

15. Об утверждении концепции импортозамещения в таможенных органах Российской Федерации до 2020 года : приказ ФТС России от 15.08.2016 № 1585. Доступ из справ.-правов. системы КонсультантПлюс в локал. сети.

16. Булохова Т.А. Проблемы и пути повышения качества транспортного обслуживания населения (железнодорожный транспорт) // Авиационное строительство и транспорт Сибири : сб. ст. X Междунар. науч.-техн. конф. Иркутск, 2018. С. 390–397.

17. Об общих положениях об оснащении пунктов пропуска через таможенную границу Евразийского экономического союза инспекционно-досмотровыми комплексами и их использовании : рекомендация Коллегии Евразийской экономической комиссии от 17.05.2016 № 7. Доступ из справ.-правов. системы КонсультантПлюс в локал. сети.

18. Об импортозамещении инспекционно-досмотровых комплексов таможенных органов / П.Н. Башлы, Д.А. Безуглов, В.Ф. Вербов и др. // Фундаментальные исследования. 2017. № 3. С. 15–19.

19. Шамаева В. Инспекционно-досмотровые комплексы в ДВТУ // Таможенная политика России на Дальнем Востоке. 2007. № 4 (41). С. 67–68.

20. A computer code to simulate X-ray imaging techniques / P. Duvauchelle, N. Freud, V. Kaftandjian et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2000. Vol. 170. Is. 1-2. P. 245–258.

21. Изучение алгоритмических особенностей проектирования компетентностного тренажера для инспекционно-досмотровых комплексов : отчет о НИР (заключит.) / ООО НПФ «ИнВайз Системс» ; рук. А.С. Гречко. Ростов-на-Дону, 2013. 195 с.

22. ИДК – инспекционно-досмотровый комплекс // Tradest : сайт. URL : <https://tradest.ru/stati/idk-inspekcionno-dosmotroviy-kompleks/> (Дата обращения 28.08.2024).

References

1. Rossiiskie zheleznye dorogi (elektronnyi resurs) [Russian Railways (electronic resource)]. Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed August 29, 2024).

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. S uchetoм trebovaniy vremeni nam nuzhny maksimal'no bystrye resheniya (elektronnyi resurs) [Taking into account the requirements of the time, we need the fastest possible solutions (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1637941&archive=2023.06.14> (Accessed August 29, 2024).

4. Anosova L.A., Korzhubaev 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]. Mos-

cow: Unitorial URSS Publ., 2011. 120 p. Available at: <http://econom.nsc.ru/ieie/Izdan/trudi/korjubaev/doklad.pdf> (Accessed August 28, 2024).

5. «PRO//Dvizhenie» na Vostok. Kak effektivno organizovat' perevozki na Dal'nem Vostoke (elektronnyi resurs) [«PRO//Movement» to the East. How to effectively organize transportation in the Far East (electronic resource)]. Available at: https://gudok.ru/content/forum_pro_dvizhenie/1669942/ (Accessed August 29, 2024).

6. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 17.01.2019 № 20-r «Ob utverzhdenii plana «Transformatsiya delovogo klimata» i priznanii utrativshimi silu aktov Pravitel'stva RF» (red. 20.01.2024) [Decree of the Government of the Russian Federation dated January 17, 2019 no. 20-r «On the approval of the plan «Transformation of the business climate» and the invalidation of acts of the Government of the Russian Federation» (ed. January 20, 2024)].

7. Vlasova A.N., Belogolov Yu.I., Olentsevich V.A. Voprosy usileniya propusknykh moshchnosti ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta na vostochnom napravlenii [Issues of increasing the capacity of railway transportation facilities in the eastern direction]. *Sbornik statei XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Upravlenie sotsial'no-ekonomicheskimi razvitiem regionov: problemy i puti ikh resheniya»* [Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference «Management of socio-economic development of regions: problems and ways to solve them»]. Kursk, 2024, pp. 89–92.

8. Ukaz Prezidenta RF ot 06.08.2014 № 560 «O primeneniі otdel'nykh spetsial'nykh ekonomicheskikh mer v tselyakh obespecheniya bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii» (red. ot 18.09.2024) [Decree of the President of the Russian Federation dated August 6, 2014 no. 560 «On the application of certain special economic measures in order to ensure the security of the Russian Federation» (ed. September 18, 2024)].

9. Arkhit B., Tayurskaya A., Olentsevich V. Informatsionnye tekhnologii elektronnoho vzaimodeistviya mezhdu Ulan-Batorskoi zheleznoi dorogoi i OAO «RZhD» [Information technologies of electronic interaction between Ulaanbaatar Railway and JSC «Russian Railways»]. *Sbornik nauchnykh statei Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Sovremennye tekhnologii, materialy i tekhnika»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference «Modern technologies, materials and equipment»]. Voronezh, 2023, pp. 39–42.

10. Bulokhova T.A., Peretolchina A.S. Uroven' razvitiya zheleznodorozhnoi infrastruktury kak faktor obespecheniya klientirovannosti otrasli i ustoičivogo razvitiya regionov [The level of development of railway infrastructure as a factor in ensuring the customer orientation of the industry and sustainable development of the regions]. *Sbornik nauchnykh statei VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razvitie ekonomicheskoi nauki na transporte: ekonomicheskaya osnova budushchego transportnykh sistem»* [Proceedings of the VII International scientific and practical conference «Development of economic science in transport: the economic basis of the future of transport systems»]. Saint Petersburg, 2019, pp. 147–154.

11. Gordeev V.N., Konyukhov V.Yu., Novikova K.I., Nagaeva A.V., Vasil'kova A.V., Shchadov I.M. Organizatsionno-ekonomicheskaya model' upravleniya innovatsionnym potentsialom Irkutskoi oblasti [Organizational and economic model of management of innovative potential of Irkutsk region]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2014. 91 p.

12. Dinets D.A., Konotopov M.V. Mezhdunarodnye transportnye koridory: perspektivy dlya Rossii [International transport corridors: prospects for Russia]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, vol. 2, pp. 48–53.

13. Chto takoe IDK – inspeksionno-dosmotrovyi kompleks (elektronnyi resurs) [What is IDK – inspection and inspection complex (electronic resource)]. Available at: <https://mwlogistics.ru/blog/inspeksionno-dosmotrovyj-kompleks-idk-v-tamozhenno-dele> (Accessed August 28, 2024).

14. Ulupov Yu.G., Myachin D.A., Chernykh V.A. Inspeksionno-dosmotrovye komplekсы: novye vozmozhnosti tamozhennoi sluzhby Rossii [Inspection and inspection complexes: new opportunities of the Customs service of Russia]. *Uchenye zapiski Sankt-Peterburgskogo imeni V.B. Bobkova filiala Rossiiskoi tamozhennoi akademii* [Scientific notes of the St. Petersburg branch of the Russian Customs Academy named after V.B. Bobkov], 2007, no. 3 (29), pp. 49–60.

15. Prikaz FTS Rossii Ministerstva finansov Rossiiskoi Federatsii ot 15.08.2016 № 1585 «Ob utverzhdenii kontseptsii impoortozameshcheniya v tamozhennykh organakh Rossiiskoi Federatsii do 2020 goda» [Order of the Federal Customs Service of the Russian Federation of the Ministry of Finance of the Russian Federation dated August 15, 2016 no. 1585 «On approval of the concept of import substitution in the customs authorities of the Russian Federation until 2020»].

16. Bulokhova T.A. Problemy i puti povysheniya kachestva transportnogo obsluzhivaniya naseleniya (zheleznodorozhnyi transport) [Problems and ways of improving the quality of public transport services (rail transport)]. *Sbornik statei X Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aviamashinostroenie i transport Sibiri»* [Proceedings of the X International scientific and technical conference «Aircraft engineering and transport of Siberia»]. Irkutsk, 2018, pp. 390–397.

17. Rekomendatsiya Kollegii Evraziiskoi ekonomicheskoi komissii ot 17.05.2016 № 7 «Ob obshchikh polozheniyakh ob osnashchenii punktov propuska cherez tamozhennuyu granitsu Evraziiskogo ekonomicheskogo soyuza inspeksionno-dosmotrovymi kompleksami i ikh ispol'zovanii» [Recommendation No 7 of the Board of the Eurasian Economic Commission dated May 17, 2016 «On the general provisions on equipping checkpoints across the customs border of the Eurasian Economic Union with inspection and inspection complexes and their use»].

18. Bashlyi P.N., Bezuglov D.A., Verbov V.F., Gamidullaev S.N. Ob impoortozameshchenii inspeksionno-dosmotrovnykh kompleksov tamozhennykh organov [On import substitution of inspection and inspection complexes of customs authorities]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2017, no. 3, pp. 15–19.

19. Shamaeva V. Inspeksionno-dosmotrovye komplekсы v DVTU [Inspection and inspection complexes in Far Eastern Customs Administration]. *Tamozhennaya politika Rossii na Dal'nem Vostoke* [Customs policy of Russia in the Far East], 2007, no. 4 (41), pp. 67–68.

20. Duvauchelle, P., Freud N., Kaftandjian V., Babot D. A computer code to simulate X-ray imaging techniques. *Nuclear In-*

struments and Methods in Physics Research B : Beam Interactions with Materials and Atoms. 2000, vol. 170, pp. 245–258.

21. Zaklyuchitel'nyi otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote po teme «Izuchenie algoritmicheskikh osobennostei proektirovaniya kompetentnostnogo trenazhera dlya inspeksionno-dosmotrovykh kompleksov» [The final report on the research work on the topic «Studying the algorithmic features of designing a competence simulator for inspection and inspection complexes»]. Rostov-on-Don: OOO NPF «InVaiz Sistems» Publ., 2013. 195 p.

22. IDK – inspeksionno-dosmotrovyi kompleks (elektronnyi resurs) [IDK – inspection and inspection complex (electronic resource)]. Available at: <https://tradedest.ru/stati/idk-inspeksionno-dosmotroviy-kompleks/> (Accessed August 28, 2024).

Информация об авторах

Булохова Татьяна Александровна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики и управления на железнодорожном транспорте, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: 677623@mail.ru.

Оленевич 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

Tat'yana A. Bulokhova, Ph.D. in Economic Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economy and Management in Railway Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: 677623@mail.ru.

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.

Применение имитационного моделирования при разработке устройства контроля состояния опоры контактной сети при ее разземлении

А.Г. Емельянов, А.В. Роголёв✉, Е.А. Морозов

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

✉a_rogalev@inbox.ru

Резюме

В статье выполнен анализ статистики отказов технических средств за период 2018–2023 гг. в рамках системы регистрации отказов технических средств устройств тягового электроснабжения Забайкальской железной дороги. Особое внимание уделяется наиболее массовым отказам, связанным с разземлением опоры контактной сети системы тягового электроснабжения из-за поврежденных высоковольтных изоляторов контактной сети, что отрицательно влияет на эффективность и избирательность работы систем релейной защиты и противоаварийной автоматики системы тягового электроснабжения, систем и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, напольных устройств централизации, сигнализации и автоблокировки. Выполнена разработка конструкции устройства контроля состояния опоры контактной сети при ее разземлении, предложен вариант реализации прибора для повышения надежности и эффективности работы релейной защиты и напольных конструкций железнодорожной автоматики и телемеханики. Достигается снижение материальных издержек, связанных с определением места расположения разземленной опоры, ввиду минимальных материальных затрат на создание данного девайса. Для исследования его работы использовано лицензионное программное обеспечение системы имитационного моделирования «Мультисим» версии 10.0. Полученный результат показал полную работоспособность модели устройства контроля состояния защитного заземления опоры контактной сети при ее разземлении. Широкое его применение позволит осуществить интеграцию в систему диагностики состояния опор контактной сети переменного тока в качестве первичного элемента, контролирующего, в том числе, вопросы электробезопасности оперативно-технического персонала и сторонних лиц. Предложенный оптический вариант выходного сигнала поможет решить проблему гальванической высоковольтной развязки и отсутствия влияния удаленности опоры от контрольного пункта в виде дистанции электроснабжения или тяговой подстанции.

Ключевые слова

статистика, отказы технических средств, устройства автоматики и телемеханики, релейная защита, контактная сеть, высоковольтная изоляция, опора контактной сети, регистрация и индикация аварийных режимов, датчик тока, оптический элемент, токоограничивающий резистор

Для цитирования

Емельянов А.Г. Применение имитационного моделирования при разработке устройства контроля состояния опоры контактной сети при ее разземлении / А.Г. Емельянов, А.В. Роголёв, Е.А. Морозов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 119–131. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).119-131.

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 28.08.2024 г.; принята к публикации: 29.08.2024 г.

The use of simulation modeling in the development of a device for monitoring the state of contact network support when it is ungrounded

A.G. Emel'yanov, A.V. Rogalev✉, E.A. Morozov

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

✉a_rogalev@inbox.ru

Abstract

An analysis of failure statistics of technical equipment for the period 2018–2023 was carried out, within the framework of the registration system for technical equipment failures of traction power supply devices of the Trans-Baikal Railway. Particular attention is paid to the most widespread failures of technical equipment associated with the ungrounding of the contact network support of the traction power supply system, due to the damage of high-voltage insulators of the contact network, which negatively affects the efficiency and selectivity of the operation of relay protection systems and emergency automatics of the traction power supply system, railway systems and automation and telemechanics devices, floor-mounted centralization devices, alarms and automatic blocking. The design of a device for monitoring the state of a contact network support when it is ungrounded has been developed, and an implementation option for this device has been proposed to improve the reliability and efficiency of relay protection and floor-mounted devices of railway automation and telemechanics. A reduction in material costs associated with determining the location of the un-

grounded support is achieved due to the minimal material costs for creating this device. To study the operation of the above-mentioned device, licensed software of the Multisim simulation system, version 10.0, was used. The obtained test result shows the full functionality of the model of the device for monitoring the state of the protective grounding of the contact network support when it is ungrounded. The widespread use of the device under development will allow integration into the system of diagnostics and control of the state of the supports of the AC contact network, as a primary element controlling, among other things, the improvement of the state of electrical safety issues of operational and technical personnel and the third parties. The proposed optical variant of the output signal will help to eliminate the issue of galvanic high-voltage isolation, the absence of the influence of the support to the control point distance, in the form of the power supply distance or traction substation.

Keywords

statistics, failures of technical equipment, automation and telemechanics devices, relay protection, contact network, high-voltage insulation, contact network support, registration and indication of emergency modes, current sensor, optical element, current-limiting resistor

For citation

Emel'yanov A.G., Rogalev A.V., Morozov E.A. Primenenie imitatsionnogo modelirovaniya pri razrabotke ustroystva kontrolya sostoyaniya opory kontaktnoi seti pri ee razzemlenii [The use of simulation modeling in the development of a device for monitoring the state of contact network support when it is ungrounded]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 119–131. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).119-131.

Article info

Received: April 10, 2024; Revised: August 28, 2024; Accepted: August 29, 2024.

Введение

При длительной эксплуатации системы тягового электроснабжения (СТЭ) все ее элементы и составляющие части изнашиваются и приходят в негодность. Высоковольтная изоляция опор контактной сети (КС), выполненная в виде гирлянды подвесных изоляторов и фиксаторного изолятора различного типа, теряет свои изоляционные свойства, что приводит к увеличению токов утечки высоковольтной изоляции и, следовательно, к возникновению коротких замыканий при перекрытии изоляторов, существенному снижению уровня электробезопасности для оперативно-технического персонала и третьих лиц, а также крайне негативно влияет на функционирование напольных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), в том числе рельсовых цепей [1].

Следствием такого процесса является нестабильное срабатывание защитных устройств релейной защиты СТЭ, приводящее к возникновению отказов технических средств (ОТС), регистрируемое в системе КАСАНТ [2], срыв рабочего режима работы напольных устройств ЖАТ, к нарушениям регулярности и последовательности перевозочного процесса. Кроме того, попадание высоковольтного потенциала в грунт приводит к повышению вероятности получения электрических травм оперативно-технологическим персоналом ОАО «РЖД» и третьих лиц, нарушаются условия электромагнитной совместимости устройств СТЭ и ЖАТ, рельсовых цепей и смежных линий связи [3].

Поэтому в рамках соглашения между Забайкальским институтом железнодорожного транспорта и Забайкальской дирекцией по энергообеспечению – структурным подразделением «ТрансЭнерго – филиала ОАО «РЖД» (ЗабНТЭ СП «ТрансЭнерго» – филиала ОАО «РЖД») о взаимодействии выполнен анализ статистики ОТС СТЭ Забайкальской железной дороги за период 2018–2023 гг., собранной в базе данных системы КАСАНТ за указанный период и показано распределение ОТС по годам (рис. 1) [4].

Результаты сбора и сортировки статистики по ОТС в СТЭ ЗабНТЭ за период 2018–2023 гг. в рамках функционирования системы КАСАНТ в количественном виде сведены в таблицу, в которой отражены собранные данные по основным видам ОТС и их распределение по годам.

Обращает на себя внимание тот факт, что наихудшими результатами обладают три вида ОТС:

- повреждения контактного провода, несущего и рессорного тросов, а также иных устройств, напрямую связанных с ним;
- повреждения, напрямую связанные с повреждением высоковольтных изоляторов КС;
- повреждения, связанные с неисправностями устройств защитного заземления опор КС, что указывает на процесс разземления опор КС [5].

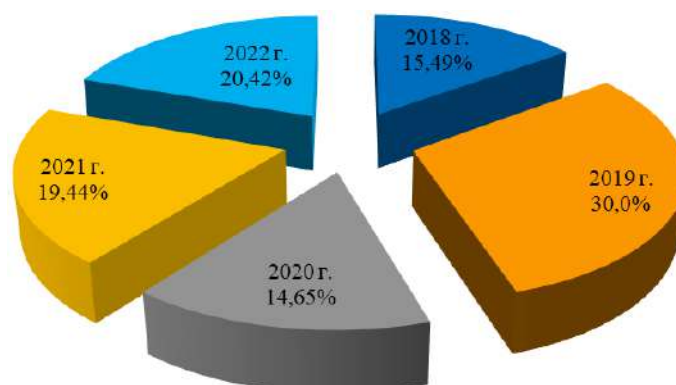


Рис. 1. Статистика распределения отказов технических средств по годам

Fig. 1. Statistics on the distribution of failures of technical means by year

Виды отказа технического средства
Types of technical failure

Наименование вида отказа технического средства Name of the type of failure of the technical means	2018	2019	2020	2021	2022	Всего, по ви- ду отказа Total, by type of failure
Контактный провод и элементы, связанные с ним (струны и рессорные тросы) The contact wire and the elements connected to it (strings and spring cables)	15	42	10	25	14	106
Усиливающий провод, несущий трос, фикси- рующие тросы, анкерочные тросы и тяги компенсаторов натяжения Amplifying wire, carrying rope, fixing ropes, anchor ropes and tension compensator rods	5	7	8	11	6	37
Элементы воздушных стрелок (модернизированных и нет) Elements of air arrows (upgraded or not)	10	15	8	9	10	52
Искровые промежутки ИПМ/ ИП-3 (в том числе глухие короткие замыкания) Spark gaps IPM/ IP-3 (including deaf short circuits)	15/0	31/7 (1 групп.)	11/2	21/2	17/3	95
Фиксаторы контактной сети Contact network retainers	8	12	11	10	9	50
Изоляторы тяговой сети Traction network insulators	7	17	7	11	13	55
Кабель сигнализации, централизации и бло- кировки и элементы, связанные с ним The alarm, centralization and blocking cable and the elements associated with it	2	5	3	3	5	18
Трансформаторы напряжения и тока Voltage and current transformers	6	11	6	3	12	44
Провода питающие, системы продольного элект- роснабжения и сигнализации, централиза- ции, блокировки Supply wires, longitudinal power supply systems and alarm, centralization, blocking	7	9	8	9	8	41

Устройства защиты тяговой сети и сигнализации, централизации, блокировки, в том числе предохранители Traction network and alarm protection devices, centralization, interlocking, including fuses	6	12	6	9	12	45
Опоры контактной сети и воздушных линий, сигнализации, централизации, блокировки и автоматической блокировки Supports of the contact network and overhead lines, alarm, centralization, blocking and automatic blocking	7	15	3	6	7	38
Выключатели силовых ячеек концевого сигнального фонаря Switches of power cells of the end signal lamp	5	9	6	7	9	36
Прочие устройства тяговых подстанций, включая телемеханику Other devices of traction substations, including telemechanics	11	12	10	7	11	46
Выключатели силовые тяговых подстанций и элементы, с ними связанные Power switches of traction substations and elements related to them	6	16	7	7	12	48
Всего отказов технических средств по годам Total failures of technical means by years	110	213	104	138	145	710

- емкостной ток утечки [6];
- сквозной ток утечки через объемную массу вещества изолятора [7];
- поверхностный ток утечки через загрязнения поверхностей изоляторов [8];
- ток утечки от частичных разрядов [9].

Отметим также, что в жестких условиях санкционного давления подавляющая масса грузоперевозок переориентируется с Запада на Восток, что в соответствии с федеральной программой модернизации Восточного полигона железных дорог на период 2013–2021 гг. (первый этап) и 2018–2022 гг. (второй этап) определяет весь вектор дальнейшего развития на десятилетия, где в качестве основных транспортных железнодорожных систем являются Байкало-Амурская магистраль (БАМ) и Транссибирская железная дорога (Транссиб) [10]. Потому логично, что основная доля грузооборота «ляжет на плечи» Транссиба. И как показывает статистика в процентном отношении, процесс увеличения грузооборота промышленных товаров и грузов во второй половине 2023 г. отчетливо прослеживается с устойчиво растущей тенденцией увеличения грузооборота (рис. 2).

Эти железные дороги проходят по территории Забайкальского края и Амурской обла-

сти. Но если БАМ на территории Забайкальского края еще остается однопутной неэлектрифицированной магистралью на тепловозной тяге, то Транссиб на всем протяжении полностью двухпутный, при этом он работает на электрической тяге.

Именно поэтому на стальной Забайкальской магистрали, входящей в состав Транссиба, с 2022 г. начата активная программа коренной реконструкции СТЭ, включающая в себя дистанции тяговых подстанций (ЭЧЭ) и дистанции контактной сети (ЭЧК). Она заключается в установке третьего тягового трансформатора, дополнительных вводных систем сборных шин открытых распределительных устройств (ОРУ) напряжением 110 или 220 кВ, а также в усилении тяговой сети на всем протяжении дороги. Заменяется контактный провод с ПБСМ–70, 95 на М120–150. При необходимости добавляются усиливающие провода М95, экранирующие провода А-185, усиливаются питающие и отсасывающие фидеры. В условиях крупных капитальных материальных вложений исправность любого вида оборудования, входящего в состав СТЭ, представляется серьезной инженерной задачей, на выполнение которой направлена данная работа, так как повышение надежности



Рис. 2. Диаграмма состояния и распределения объемов грузоперевозок в 2018–2023 гг.
Fig. 2. Diagram of the status and distribution of freight volumes during the period 2018–2023

функционирования контактной сети СТЭ связана напрямую со стабилизацией параметров перевозочного процесса в целом и минимизацией финансовых и материальных потерь ЭЧЭ и ЭЧК, а также дистанций сигнализации и связи (ШЧ), и в том числе на устранение ОТС по причине разземления опор КС.

Актуальность проблемы и постановка задачи

Повышение объемов грузоперевозок приводит к резкому ухудшению электромагнитной обстановки в СТЭ. Особенно это негативно отражается на состоянии высоковольтной изоляции опор КС. Защитными элементами конструкций являются проводник защитного заземления и искровой промежуток (ИП), от состояния которых напрямую зависит состояние опоры КС в целом.

Целью данной статьи является разработка имитационной модели, позволяющей учитывать целый ряд реальных физических свойств высоковольтной изоляции и опорных конструкций КС. Модель высоковольтной изоляции опоры КС представляется в виде линейных электротехнических элементов – неполярных конденсаторов, а модели конструктивных элементов опоры КС, через которые идет формирование токов утечки высоковольтной изоляции, в виде омических резисторов. Применение схемы имитационного моделирования позволяет исследовать процесс аварийной работы опоры КС, например в условиях ее разземления и (или) пробоя высоковольтной изоляции.

Основные понятия и процессы при разземлении опор контактной сети

Под разземлением опор КС подразумевается полная, практически до нуля, потеря ее сопротивления в результате двух возможных событий:

– выхода из строя высоковольтной изоляции (гирлянды изоляторов или фиксаторного изолятора), что вызовет перекрытие ее в виде электродугового разряда;

– сквозного пробоя защитного ИП, встроенного в заземляющий спуск, по причине перенапряжений или перекрытия гирлянды высоковольтных изоляторов, поддерживающих несущий трос, либо фиксаторного изолятора.

В процессе формирования разземления опор КС участвуют два компонента – высоковольтная изоляция (изоляторы) и устройство защитного заземления. Между металлической консолью (изолированной или неизолированной) и телом железобетонной опоры устанавливаются изолирующие прокладки в виде резинотехнических или пластиковых шайб и прокладок, обеспечивающих переходное сопротивление не менее 10 кОм, предотвращающее прохождение тока утечки высоковольтных изоляторов. В случае применения металлических опор эти изолирующие прокладки и шайбы устанавливаются между торцом основания опоры и ее фундаментом. Также между бетонным фундаментом и анкерной растяжкой опоры анкерного типа устанавливаются изолирующие деревянные прокладки.

В состав устройства защитного заземления входят:

- металлический проводник заземляющего спуска, в верхней части опоры соединенный с консолью, в нижней части – с тяговым рельсом через ИП (диаметр прутка – 10 мм для переменного тока, материал прутка – оцинкованная сталь Ст45 с удельным погонным сопротивлением $0,0137 \text{ Ом} \cdot \text{м}$);

- ИП типов ИП-3, ИПМ, ИП-62 и др.

Учитывать необходимо то обстоятельство, что заземляющий спуск на последнем участке уложен на деревянные полшпалы. Кроме того, если на опоре КС смонтированы дополнительные линии трехфазной системы продольного электроснабжения напряжением 10 кВ, системы «два провода – рельс» напряжением 35 кВ, сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) напряжением 10 кВ, линии волоконно-оптического кабеля (ВОК), то они также имеют свою высоковольтную изоляцию, а значит и свои токи утечки.

Но, так как токи утечки идут одними и теми же путями, они складывается с током утечки КС и потому напряжение 800/1 200 или 1 400/1 600 В достигается гораздо быстрее и вызывает срабатывание устройства защитного заземления быстрее.

Так как в данной работе рассматривается вариант промежуточной опоры без дополнительных высоковольтных линий, разность потенциалов, приложенных к ИП, формируется за счет токов утечки консольной изоляции (для любого типа консоли) [11]. К таким токам утечки по элементам высоковольтной изоляции относятся:

- ток утечки гирлянды подвесных высоковольтных изоляторов в количестве четырех штук, посредством которых несущий трос крепится непосредственно к консоли;

- ток утечки высоковольтного фиксаторного изолятора, который обеспечивает непосредственную механическую фиксацию контактного провода относительно несущего троса и оси пути;

- пластмассовые изолирующие вставки между консолью и телом опоры, обеспечивающие формирование основной изоляции консоли от тела опоры, размещенные под верхней тягой и под пятой консоли;

- полшпалы, подложенные под проводник заземляющего спуска на участке «опора –

рельс» (рис. 3).

Применение имитационного моделирования для разработки устройства контроля состояния опоры контактной сети при ее разземлении

В качестве программного продукта для имитационного моделирования использовано лицензионное программное обеспечение «Мультисим» версии 10.0, выпущенное канадской фирмой National Instruments, предустановленное в компьютерном классе кафедры электроснабжения Забайкальского института железнодорожного транспорта [12]. Схема самого устройства контроля состояния опоры КС при ее разземлении приведена на рис. 4. Устройство контроля состояния опоры КС состоит из:

- датчика тока, например в виде трансформатора тока 1/15 [13];

- токоограничивающего резистора (номинал резистора подбирается при настройке);

- светодиода – индикатора разземления опоры КС (передающая половина оптопары ВОК).

Электрическая схема устройства, содержащего минимум конструктивных элементов, имеет следующие части и преимущества:

1. Не имеет металлического корпуса, куда помещается сама схема и частично датчик тока.

2. Корпус устройства, выполненный из пластикового материала, обладает минимальными массогабаритными показателями, так как на печатной плате размещается фактически всего два электронных компонента – светодиод и резистор. При этом необходимо помнить, что светодиод не непосредственный индикатор состояния опоры, а всего лишь символическое обозначение передающей части аппаратуры передачи через ВОК информационного сигнала, в реальности на его месте будет лазерная излучающая головка передачи оптического сигнала посредством ВОК.

3. Датчик тока представляет собой трансформатор в виде разрезанного на две половинки кольцевого магнитопровода, выполненный в виде ферритового кольца марки К45×10×6 мм с высокой магнитной проницаемостью в диапазоне 1 000–10 000 ед. из магнитного сплава типа ЮНДК6 или 10 [14].

На одной из половинок ферритового кольца намотана обмотка из 10 ± 5 витков обмоточного эмалированного провода (подбирается при настройке) марки ПЭВ-2 диаметром

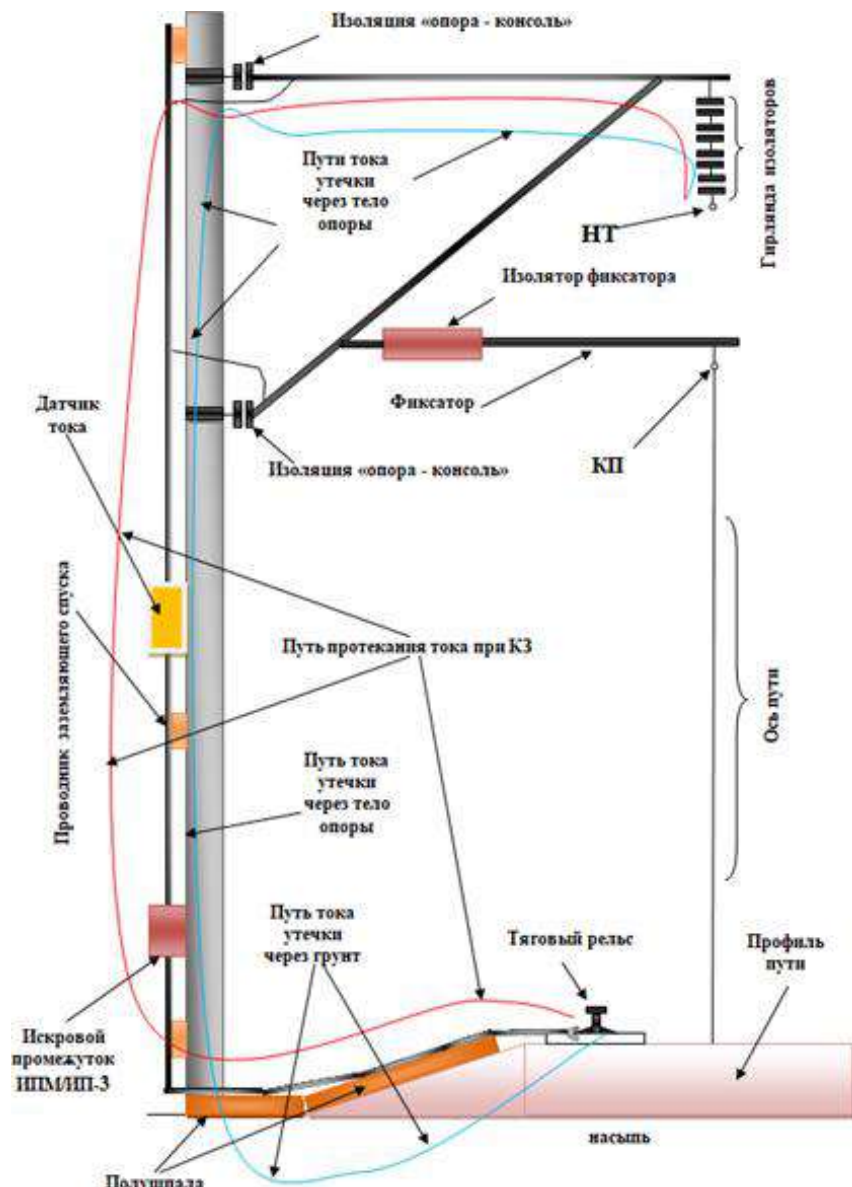


Рис. 3. Пути токов утечки высоковольтной изоляции: до (линия синего цвета) и после (линия красного цвета) срабатывания устройства защитного заземления
Fig. 3. Leakage current paths of high-voltage insulation: before (blue line) and after (red line) triggering of protective grounding devices

0,15 мм с поливинилхлоридовой изоляцией, при этом выводы обмотки выведены и распаяны непосредственно на плату, содержащую светодиод и резистор [15].

У данного трансформатора тока в качестве первичной обмотки выступает существующий металлический проводник заземляющего спуска, выполненный из стали Ст45, а вторичная обмотка – намотанная на вышеупомянутый ферритовый сердечник обмотка [16].

Вторая половинка ферритового кольца не имеет обмотки и при монтаже непосредственно

на опору охватывает с одной стороны проводник заземляющего спуска, с другой – половину магнитопровода, имеющего обмотку. Вместе они соединяются при помощи двух элементов: нанесенного на торцы половинок обмотки специализированного технического клея, а весь корпус устройства скрепляется при помощи пластиковых самозатягивающихся зубчатых стопорных хомутов [17].

Учитывая тот факт, что в сборе все устройство имеет незначительный вес, то оно крепится непосредственно за счет самого

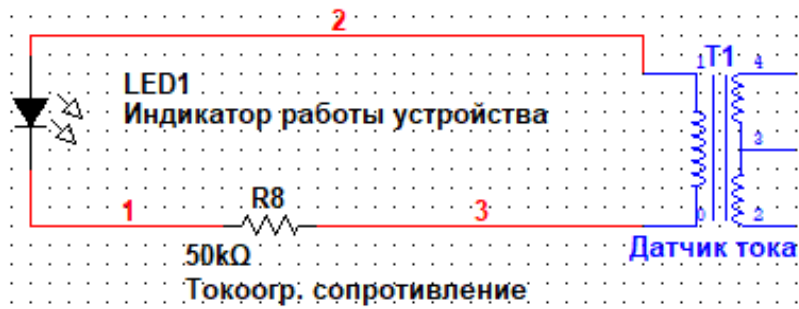


Рис. 4. Схема устройства контроля состояния опоры контактной сети
 Fig. 4. Diagram of the device for monitoring the state of the contact network support

проводника заземляющегося спуска на высоте примерно 4,5 м от условного обреза фундамента.

На рис. 5–9, показывающих принцип работы схемы устройства, в качестве модели ИП

выступает реле, управляемое напряжением, с порогом срабатывания в 1 200 В, соответствующее реальному ИП.

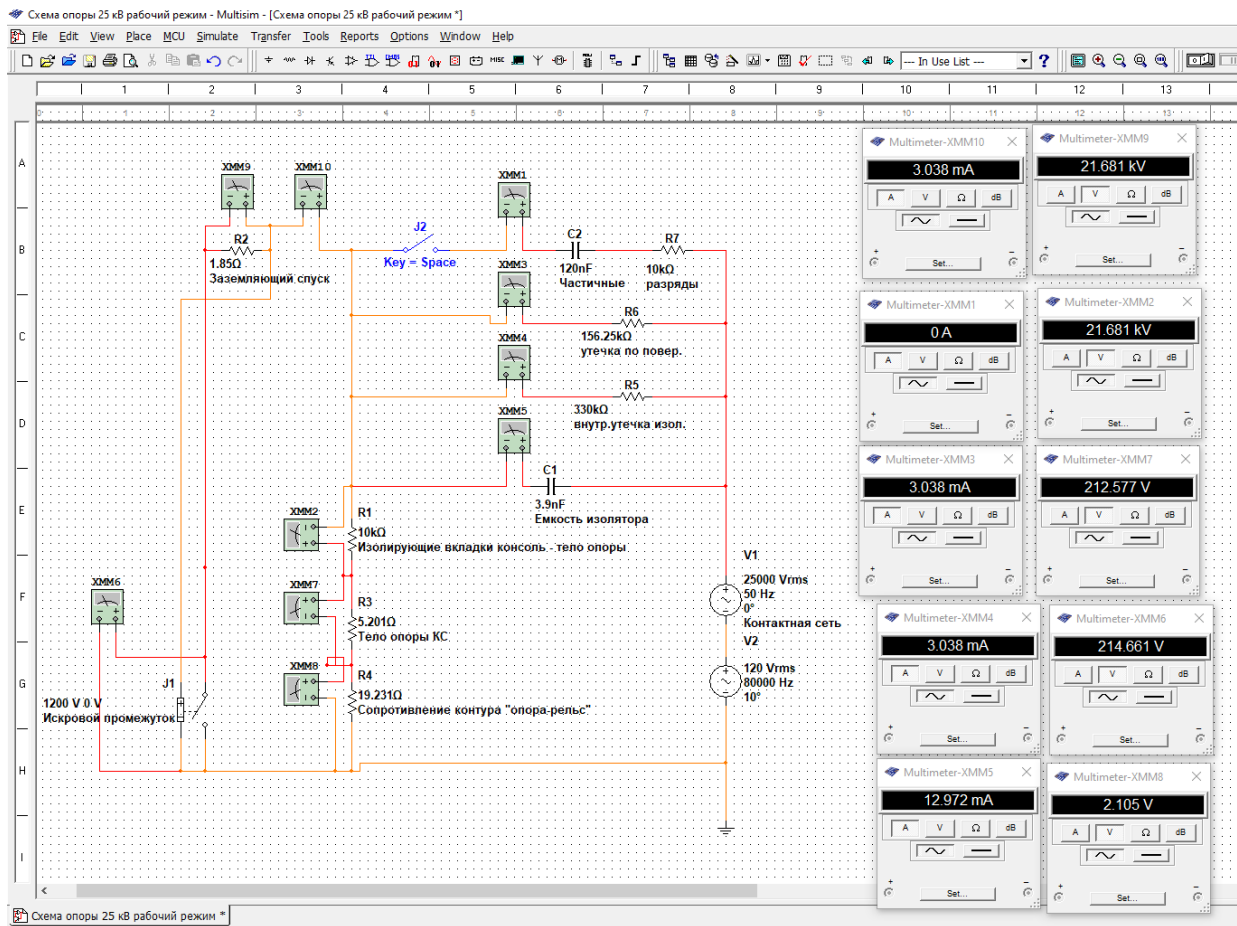


Рис. 5. Режим рабочий (без частичных разрядов, выключен ключ J2).

Искровой промежуток не пробит, не сработало реле J1

Fig. 5. Operating mode (without partial discharges, the J2 key is turned off).

The spark gap has not been broken, relay J1 has not worked

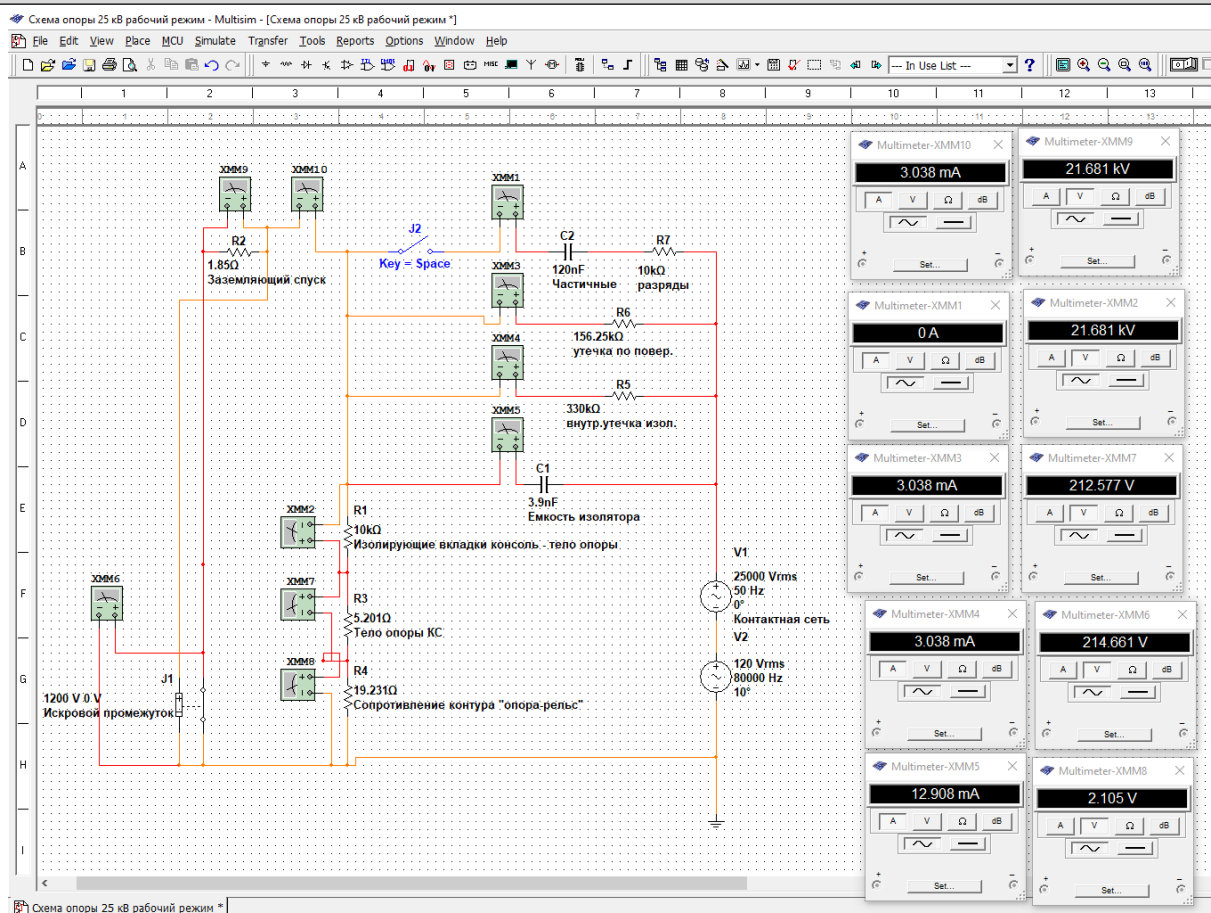


Рис. 6. Аварийный режим (без частичных разрядов, выключен ключ J2).

Искровой промежуток пробит, сработало реле J1.

Fig. 6. Emergency mode (without partial discharges, the J2 key is turned off).

The spark gap has been broken, relay J1 has been triggered

Заключение

Проведен анализ статистики отказов технических средств СТЭ за период 2018–2023 гг. Определены параметры отказов, непосредственно связанные с отказом высоковольтной изоляции и защитного заземления. Определены условия для проведения имитационного эксперимента, выбрано соответствующее программное обеспечение – лицензионное ПО «Мультисим» версии 10.0.

Проведено имитационное моделирование, в ходе которого поставленная задача по разработке устройства для контроля состояния опоры КС решена – получен результат, при котором получено устойчивое срабатывание модели индикатора в виде реакции на пробой ИП, выполненного в виде модели на основе реле напряжения с установкой срабатывания в 1 200 В [18].

Достоинства предложенной конструкции устройства контроля состояния опоры КС при

ее разземлении заключаются в следующем:

1. Принципиально отсутствует заземление элементов схемы в любом виде, т.е. нет проблем, связанных с размещением устройства в зоне сильного электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока напряжением 1×25 кВ [19].

2. Корпус не имеет никаких металлических частей, так как выполнен из пластика, что убирает вопрос электромагнитной совместимости.

3. Крепление корпуса устройства не представляет каких-либо механических проблем, применение же пластиковых (немагнитных) зубчатых жгутов для его крепления позволяет при необходимости демонтажа просто перекусить монтажными кусачками хомуты и снять устройство с заземляющего спуска. Кроме того, при необходимости можно просто сломать датчик тока и снять устройство в целом ввиду принципиально минимальной стоимости устройства, т.е.

оно обладает максимальной простотой технического монтажа и демонтажа;

4. Выходной сигнал устройства может быть оптическим, как описано в данной работе, или в виде радиочастотного комплекта, например, телефона-модема, работающего в GSM-R-частотном радиодиапазоне, соединенного с выходом устройства, и при этом принципиально отсутствуют какие-либо физические линии связи для передачи данных. Тем самым обеспечивается максимальная мобильность устройства контроля состояния опоры КС при ее разземлении и защита любой информации, передаваемой по этому радиоканалу. Питание радиочастотного устройства будет от подобного трансформатора тока, т.е. работать оно будет только тогда, когда по заземляющему спуску будет проходить ток короткого замыкания [20].

5. Устройство обладает в достаточной мере технологичностью и практически не нужда-

ется в частом обслуживании после его настройки в лабораторных условиях и имитационном моделировании его работы при разземлении опоры КС, а также после его монтажа на месте установки на опору КС.

6. Выходной сигнал устройства контроля состояния опор КС позволяет ему легко интегрироваться с любой распределенной автоматизированной системой управления или автоматизированным рабочим местом, применяемом в ЗаБНТЭ или в других службах.

7. Принципиально малая себестоимость устройства позволит оснастить им максимальное количество опор КС, что дает неоспоримое преимущество – полный контроль опорного хозяйства, входящего в состав инфраструктуры ЗаБНТЭ и службы «Ш» в пределах его территориальной границы, что существенно снизит затраты, связанные с поиском и идентификацией конкретной аварийной опоры КС.

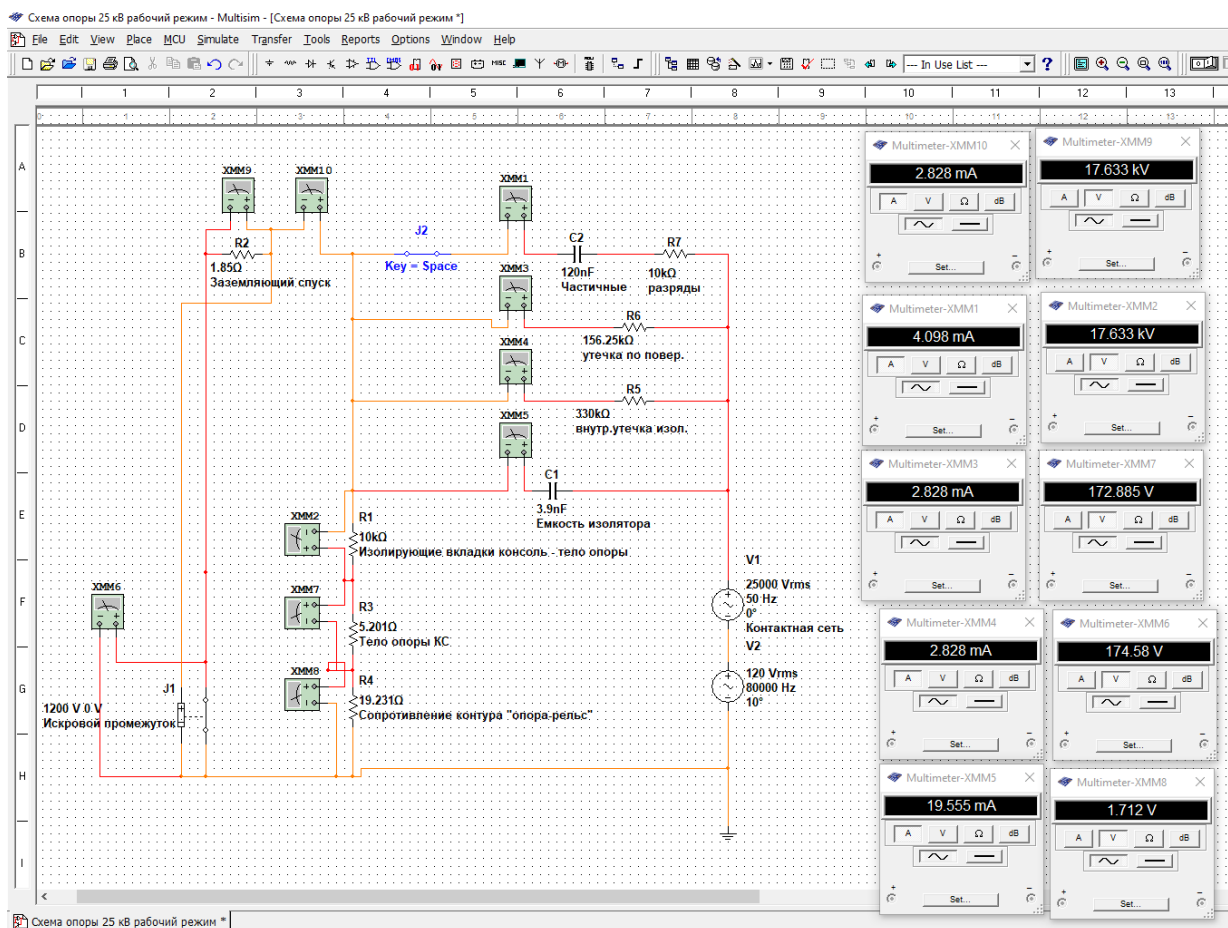


Рис. 7. Аварийный режим (с частичными разрядами, включен ключ J2).

Искровой промежутки пробит, реле J1 сработало

Fig. 7. Emergency mode (with partial discharges, the J2 key is enabled).

The spark gap is broken, relay J1 has been triggered

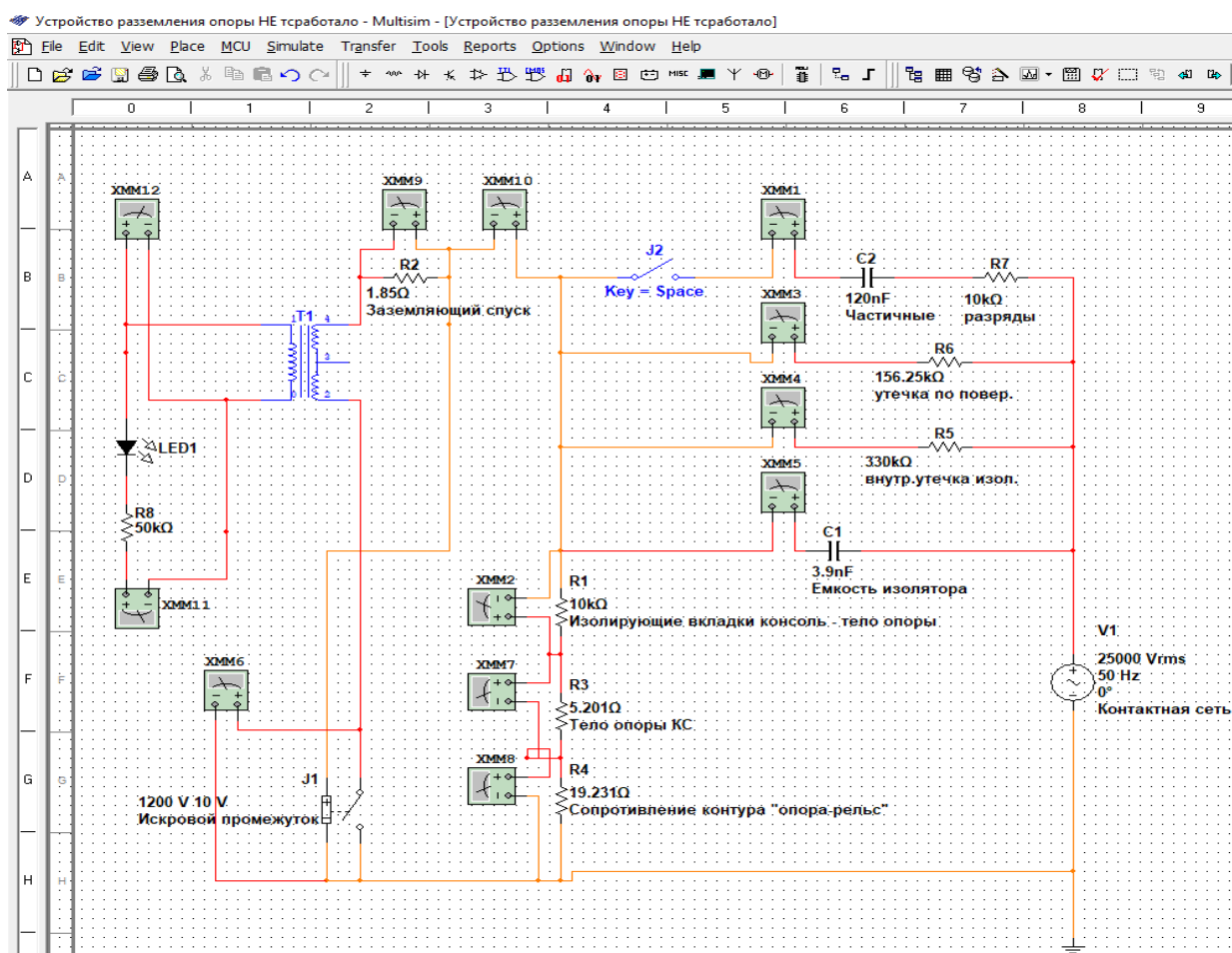


Рис. 8. Работа устройства контроля состояния опоры контактной сети (при нормальном режиме работы опоры контактной сети), реле J1 не сработало, индикатор LED1 не сработал
Fig. 8. Operation of the contact network support condition monitoring device (in the normal mode of operation of the contact network support), relay J1 has not been triggered, LED1 indicator has not been triggered

Список литературы

1. Шаманов В.И. Проблемы электромагнитной совместимости рельсовых цепей с тяговой сетью // Автоматика на транспорте. 2019. Т. 5. № 2. С. 160–185.
2. Об утверждении документов ОАО «РЖД» по вопросам учета отказов в работе технических средств и технологических нарушений на инфраструктуре ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» № 1915/р от 06.09.2021 г. (ред. 07.11.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
3. Mohmmad A. Uplink Radio Resource Management for QoS Provisioning in Long Term Evolution (with Emphasis on Admission Control and Handover): ph.D.'s thesis. Aalborg, 2009. 169 p.
4. Сюй Ц. Принципы моделирования оперативной работы энергодиспетчера // Междунар. журн. гуманитарных и естественных наук. 2024. № 5-4 (92). С. 91–99.
5. Дынькин Б.Е. Защита тяговых сетей переменного тока при разземлении опор контактной сети. Хабаровск: ДВГУПС, 1999. 165 с.
6. Титков В.В., Халилов Ф.Х. Перенапряжения и молниезащита. СПб.: Лань, 2016. 224 с.
7. Андреев О.В., Вакулин А.А., Киселева К.В. Материаловедение. Тюмень: ТГУ, 2013. 630 с.
8. Халилов Ф.Х., Егоров В.В., Смирнов А.А. Техника высоких напряжений и электротехнические материалы: в устройствах железнодорожного транспорта. СПб.: Талекс, 2007. 539 с.
9. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
10. У Восточного полигона сдвигаются точки // Коммерсантъ: сайт. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5571923> (Дата обращения 03.04.2024).
11. О совершенствовании системы содержания объектов энергетического комплекса: распоряжение ОАО «РЖД» № 1812/р от 18.08.2021 г. (ред. 28.02.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.

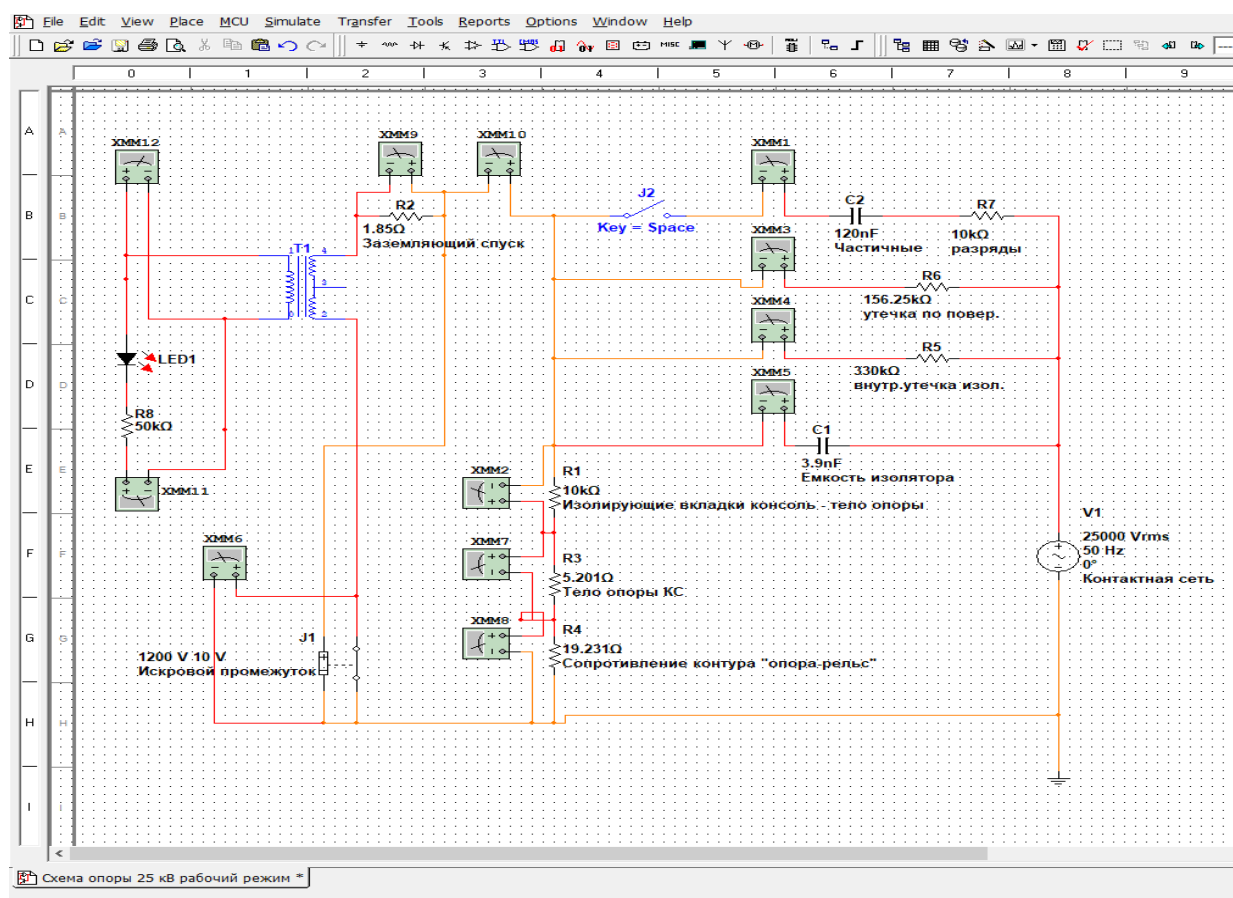


Рис. 9. Работа устройства контроля в режиме разземления опоры контактной сети (сработало реле J1 и индикатор LED1 включен)

Fig. 9. Operation of the monitoring device in the grounding mode of the contact network support (relay J1 has been triggered and the LED1 indicator is on)

12. Кузовкин В.А., Филатов В.В. Схемотехническое моделирование электрических устройств в Multisim. Старый Оскол : ТНТ, 2022. 336 с.
13. Aharoni A. Introduction to the Theory of Ferromagnetism. Oxford : Clarendon Press, 1996. 326 p
14. Brown W.F. Jr. Magnetostatic Principles in Ferromagnetism. Amsterdam : North-Holland Publishing Company, 1962. 202 p..
15. Гуляев В.Г. Электротехника и электроника. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2019. 124 с.
16. Марочник сталей и сплавов / под общей ред. А.С. Зубченко. М. : Машиностроение, 2003. 784 с.
17. Нейлоновые кабельные стяжки NORMA // NORMARus : сайт. URL : <https://normarus.ru/kabelnye-stjazhki/> (Дата обращения 05.04.2024).
18. Московский энергомеханический завод : сайт / МЭЗ подразделение ДКРЭ ОАО «РЖД». URL : <https://mez.ru/about/> (Дата обращения 05.04.2024).
19. Paul C.R. Introduction to electromagnetic compatibility. New York : Wiley-Interscience, 1992. 765 p.
20. Wireless Body Area Networks: A Survey / S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman et al. // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2014. Vol. 16. Iss. 3. P. 1658–1686. DOI 10.1109/SURV.2013.121313.00064.

References

1. Shamanov V.I. Problemy elektromagnitnoi sovmestimosti rel'sovykh tsepei s tyagovoi set'yu [Problems of electromagnetic compatibility of rail circuits with traction network]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2019, Vol. 5, no 2, pp. 160–185.
2. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» № 1915/r от 06.09.2021 г. «Ob utverzhdenii dokumentov ОАО «RZhD» po voprosam ucheta otkazov v rabote tekhnicheskikh sredstv i tekhnologicheskikh narushenii na infrastrukture ОАО «RZhD» (red. 07.11.2023) [Order of JSC «Russian Railways» No 1915/r dated September 6, 2021 «On approval of documents of JSC «Russian Railways» on accounting for failures in the operation of technical means and technological violations on the infrastructure of JSC «Russian Railways» (ed. November 7, 2023)].
3. Mohmmad A. Uplink Radio Resource Management for QoS Provisioning in Long Term Evolution (with Emphasis on

Admission Control and Handover). Ph.D.'s thesis. Aalborg, 2009. 169 p.

4. Syui Ts. Printsipy modelirovaniya operativnoi raboty energodispatchera [Principles of modeling the operational work of an energy dispatcher]. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [International Journal of Humanities and Natural Sciences], 2024, no 5-4 (92), pp. 91–99.

5. Dyn'kin B.E. Zashchita tyagovykh setei peremennogo toka pri razzemlenii opor kontaktnoi seti [Protection of AC traction networks when grounding contact network supports]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 1999. 165 p.

6. Titkov V.V., Khalilov F.Kh. Perenapryazheniya i molniezashchita [Overvoltage and lightning protection]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2016. 224 p.

7. Andreev O.V., Vakulin A.A., Kiseleva K.V. Materialovedenie [Materials Science]. Tyumen': TGU Publ., 2013. 630 p.

8. Khalilov F.Kh., Egorov V.V., Smirnov A.A. Tekhnika vysokikh napryazhenii i elektrotekhnicheskie materialy: v ustroistvakh zheleznodorozhnogo transporta [High voltage engineering and electrical materials: in railway transport devices]. Saint-Petersburg: Taleks Publ., 2007. 539 p.

9. Tareev B.M. Fizika dielektricheskikh materialov [Physics of dielectric materials]. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 320 p.

10. U Vostochnogo poligona sdvigayutsya tochki (elektronnyi resurs) [Points are shifting near the Eastern polygon (electronic resource)]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/5571923> (Accessed April 3, 2024).

11. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 1812/r ot 18.08.2021 g. «O sovershenstvovanii sistemy sodержaniya ob'ektov energeticheskogo kompleksa» (red. 28.02.2023) [Order of JSC «Russian Railways» No 1812/r dated August 18, 2021 «On improving the maintenance system of energy complex facilities» (ed. February 28, 2023)].

12. Kuzovkin V.A., Filatov V.V. Skhemotekhnicheskoe modelirovanie elektricheskikh ustroystv v Multisim [Circuit engineering modeling of electrical devices in Multisim]. Staryi Oskol: TNT Publ., 2022. 336 p.

13. Aharoni A. Introduction to the Theory of Ferromagnetism. Oxford : Clarendon Press, 1996. 326 p.

14. Brown W.F. Jr. Magnetostatic Principles in Ferromagnetism. Amsterdam : North-Holland Publishing Company, 1962. 202 p.

15. Gulyaev V.G. Elektrotehnika i elektronika [Electrical engineering and electronics]. Nizhnii Novgorod: NNGASU Publ., 2019. 124 p.

16. Marochnik stali i splavov [Brand of steels and alloys] / Ed. by Zubchenko A.S. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p.

17. Neilonovye kabel'nye styazhki NORMA (elektronnyi resurs) [Nylon cable ties NORMA (electronic resource)]. Available at: <https://normarus.ru/kabelnye-stjazhki/> (Accessed April 5, 2024).

18. Moskovskii energomekhanicheskii zavod (elektronnyi resurs) [Moscow Power Engineering Plant (electronic resource)]. Available at: <https://mez.ru/about/> (Accessed April 5, 2024).

19. Paul C.R. Introduction to electromagnetic compatibility. New York : Wiley-Interscience, 1992. 765 p.

20. Movassaghi S., Abolhasan, M., Lipman, J., Smith D., Jamalipour A. Wireless Body Area Networks: A Survey // IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2014, Vol. 16, iss. 3, pp. 1658–1686. DOI 10.1109/SURV.2013.121313.00064.

Информация об авторах

Емельянов Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; e-mail: aleksandr-emelja@mail.ru.

Рогалёв Андрей Владимирович, кандидат педагогических наук, доцент кафедры электроснабжения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; e-mail: a_rogalev@inbox.ru.

Морозов Егор Андреевич, кафедра электроснабжения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; e-mail: 2002morozov@bk.ru.

Information about the authors

Alexander G. Emel'yanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power Supply, Trans-Baikal Institute of Railway Transport – a branch of the Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: aleksandr-emelja@mail.ru.

Andrei V. Rogalev, Ph.D. in Pedagogical Science, Associate Professor of the Department of Power Supply, Trans-Baikal Institute of Railway Transport – a branch of the Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: a_rogalev@inbox.ru.

Egor A. Morozov, the Department of Power Supply, Trans-Baikal Institute of Railway Transport – a branch of the Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: 2002morozov@bk.ru.

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

INFORMATION TECHNOLOGY

Диагностирование подвижного состава с применением RBF-сетей

И.И. Лакин✉

Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта, г. Москва, Российская Федерация

✉Lakin16@mail.ru

Резюме

Современные автоматизированные системы управления создаются как киберфизические производственные структуры, когда информация собирается из нескольких информационных массивов для принятия управленческих решений. При техническом обслуживании и ремонте тягового подвижного состава в автоматизированные системы управления должны поступать сведения с бортовых сетей диагностирования для обнаружения предотказных состояний оборудования и планирования индивидуального объема ремонта. Определяется принадлежность диагностируемого события по близости к вектору класса. В статье за основу взяты из сети Интернет примеры расчета принадлежности объекта диагностирования к одному из возможных классов по данным обучающей выборки, на базе которых разработана собственная программа на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications в среде MS Excel. Программа верифицирована на тестовых примерах. Она автоматически определяет объем обучающей выборки и число классов, позволяет проводить многоитерационные расчеты. Предложено контролировать процент принадлежности к каждому классу. С помощью программы выполнены расчеты для специально составленной обучающей выборки токов четырех тяговых электродвигателей одной секции локомотива – по десять событий для каждого класса. Всего задано пять классов: исправное состояние («норма») и отказы каждого из четырех двигателей. Данные имеют случайный разброс значений в пределах класса. Смоделированы одновременные отказы и предотказные состояния одного, двух и трех двигателей. Расчеты показали высокую результативность метода, особенно в части определения принадлежности к классу «норма». Сделан вывод об эффективности представленного алгоритма. Предлагается использовать его как инкапсулированный в программное обеспечение при планировании индивидуального объема технического обслуживания и ремонта с постоянным обучением за счет пополнения выборки.

Ключевые слова

RBF-сети, программирование на Visual Basic for Applications, диагностирование отказов тягового подвижного состава, автоматизированные системы управления, техническое обслуживание и ремонт

Для цитирования

Лакин И.И. Диагностирование подвижного состава с применением RBF-сетей / И.И. Лакин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 133–142. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).133-142.

Информация о статье

поступила в редакцию: 13.06.2024 г.; поступила после рецензирования: 12.09.2024 г.; принята к публикации: 13.09.2024 г.

Rolling stock diagnostics using RBF networks

I.I. Lakin✉

Engineering Center of Railway Transport, Moscow, the Russian Federation

✉Lakin16@mail.ru

Abstract

Modern automated control systems are created as cyberphysical production systems, when information is collected from several information systems for making management decisions. During maintenance and repair of traction rolling stock, automated control systems must receive information from on-board diagnostic systems to determine the pre-failure conditions of the equipment and plan an individual repair volume. The affiliation of the diagnosed event is determined by proximity to the class vector. The article is based on examples from the Internet of calculating the belonging of the diagnostic object to one of the possible classes according to the training sample data, based on which a proprietary program in the algorithmic language Visual Basic for Applications in the MS Excel environment has been developed. The program has been verified using test examples. The program automatically determines the size of the training sample and the number of classes, and allows to perform many iterative calculations. It is proposed to control the percentage of belonging to each class. Using the program, calculations were performed for a specially compiled training sample of the currents in four traction electric motors of one section of the locomotive: 10 events for each class. There are 5 classes in total: serviceable condition («normal») and failures of each of the four engines. The data has a random spread of values within the class. Simultaneous failures and pre-failure conditions of one, two and three engines are simulated. Calculations have shown the high efficiency of the method, especially in terms of determining the belonging to the «norm» class. The conclusion is made about the effectiveness of the proposed algorithm. It is proposed to use it as encapsulated in software when planning an individual volume of maintenance and repair with constant training by replenishing the sample.

Keywords

RBF networks, VBA programming, diagnostics of traction rolling stock failures, automated control systems, maintenance and repair

For citationLakin I.I. Diagnostirovanie podvizhnogo sostava s primeneniem RBF-setei [Rolling Stock Diagnostics using RBF networks]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 133–142. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).133-142.**Article Info**

Received: June 13, 2024; Revised: September 12, 2024; Accepted: September 13, 2024.

Введение

Одна из главных характеристик сложного оборудования локомотивов – это надежность [1], что в полной мере относится и к тяговому подвижному составу (ТПС) [2]. Один из главных способов обеспечения надежности – система планово-предупредительного технического обслуживания и ремонта (ТОиР) [3]. Один из главных показателей надежности – коэффициент технической готовности (в ОАО «РЖД» – коэффициент готовности к эксплуатации), характеризующий долю простоя ТПС на ТОиР. Один из основных способов повышения использования ТПС – диагностирование отказов на этапе предотказного состояния.

Современный ТОиР должен быть обеспечен автоматизированной системой управления (АСУ) [4–6] с обязательным использованием бортовых, стационарных и переносных автоматизированных систем технического диагностирования [7]. Очень важно в АСУ ТОиР по принципу инкапсуляции использовать современные математические методы, тем самым повышая качество принятия управленческих решений [8–10].

Современная АСУ ТОиР должна создаваться как киберфизическая производственная система (Cyber Physical Production System – CPPS) [11], объединяя в себе информацию других АСУ, прежде всего бортовых автоматизированных систем технического диагностирования. Этому научно-практическому направлению посвящен целый ряд работ, имеющих важное значение для ТОиР [12–15]. Именно бортовое диагностирование позволяет определить индивидуальный объем ТОиР. Автором в рамках работы над АСУ ТОиР тягового подвижного состава рассмотрен один из самых распространенных простейших видов искусственных нейронных сетей для определения принадлежности объекта к одному из возможных классов из обучающей выборки – сеть радиально-

базисных функций (Radial Basis Function Networks), предложенная в 1988 г. [16, 17].

Цель исследования – анализ информативности диагностирования технического состояния оборудования с использованием методики RBF-сетей (Radial basis function network), где параметры события рассматриваются как координаты нормализованных векторов.

Для верификации исследования взят учебный пример расчета RBF-сети в среде MS Excel с использованием встроенных функций [18]. Сначала был воспроизведен пример, затем он же реализован на алгоритмическом языке программирования Visual Basic for Applications (VBA) в среде MS Excel [19, 20] с верификацией результатов. Далее разработана собственная программа с расширенной функциональностью и выполнено исследование.

Разработанное программное обеспечение

Перед стартом программы необходимо ввести в лист Excel исходные данные (рис. 1). В строке с символом «#» вводятся данные о диагностируемом объекте X_0 (строка 5), а начиная с символа «@» – данные обучающей выборки X_i , число которых ограничено возможностями Excel (1 млн строк): $i < 1\,000\,000$.

	A	B	C	D	E	F
3						
4		Расчитанный класс	Sigma	1	2	3
5	#		0,1	500	800	900
6						
7						
8						
9	@					
10	№	Класс		1	2	3
11	1	Класс 1		1	2	3

Рис. 1. Исходные данные для расчета**Fig. 1.** Initial data for calculation

Символы «#» и «@» нужны для возможности менять верхнюю часть листа – программа автоматически найдет начало информации. Также программа позволяет задавать любое число параметров K , но их число у диагностируемого объекта X_0 и у обучающей выборки X_i

должно совпадать. У X_0 дополнительно считывается заданное значение активационной функции σ («ширина окон активационных функций нейронов скрытого шара»), определяющий влияние расходимости радиуса. По умолчанию $\sigma = 0,1$. У обучающей выборки X_i дополнительно считывается класс принадлежности каждого элемента: любая текстовая информация (в примере – это «класс 1»). Далее будет предложено определять класс принадлежности события к отказу, предотказному или работоспособному состоянию в процессе расчета.

После старта программы (нажатием клавиш Alt-F8 – Enter) создаются и обнуляются рабочие массивы $S(EvnMax, PrmMax)$, $Class(ClsMax,1)$ и $ClassSrt(ClsMax,1)$. Далее с текущего листа считываются в массив S все исходные данные X_0 и X_i с автоматическим определением заданного числа параметров $PrmMx \leq PrmMax$ и объема обучающей выборки $EvnMx \leq EvnMax$. Одновременно определяется число классов $ClsMx \leq ClsMax$. Сами классы записываются в массив $Class$. При успешном считывании данных переменная $ys = true$, в противном случае работа программы завершается: *if not ys then Exit Function*.

Рассматриваемый метод предполагает нормализацию исходных параметров, которые рассматриваются как координаты многомерного вектора: каждая координата делится на евклидово расстояние md – корень квадратный из суммы квадратов координат:

```
For k = 0 To EvnMx
  md = 0
  For kk = 1 To PrmMx
    md = md + (S(k, kk))
  Next kk
  md = (md) ^ (0.5)
  For kk = 1 To PrmMx
    S(k, kk) = S(k, kk) / md
  Next kk
Next k
```

В результате нормализации все параметры (вершины векторов) как бы находятся в круге радиуса 1 при $K = 2$, в шаре при $K = 3$ и т.д. с границами 1 каждая. В результате параметры $\{1, 2, 3\}$, $\{10, 20, 30\}$, $\{100, 200, 300\}$ будут восприняты как относящиеся к одному классу. Например, фотообъект будет отнесен к своему классу независимо от размера объекта. Эту особенность методики следует учитывать при формировании классов.

После нормализации параметров программа рассчитывает функцию активации F_i для каждого события, кроме диагностируемого, и записывает результаты расчета в массив S :

```
For k = 1 To EvnMx
  Fi = 0
  For kk = 1 To PrmMx
    Fi = Fi + S(k, kk) * S(0, kk)
  Next kk
  Fi = Fi - 1
  Fi = Fi / ((Sigma) ^ (2))
  Fi = Exp(Fi)
  S(k, PrmMax) = Fi
Next k
```

Функция активации события i представляет собой экспоненциальное выражение вида:

$$F_i = \sum (\text{Exp}(X_i \cdot X_0 - 1) / \sigma^2).$$

Произведение нормализованных координат $X_i \cdot X_0 \leq 1$. Тогда $(X_i \cdot X_0) - 1 \leq 0$. Так как $\sigma^2 > 0$, то степень экспоненты всегда отрицательная. Значит функция всегда $F_i > 0$, но $F_i \leq 1$. С ростом произведения $(X_i \cdot X_0)$ $F_i \rightarrow 1$: с ростом каждой координаты ($X_i \rightarrow 1, X_0 \rightarrow 1$), с ростом значимости параметра растет его вклад в F_i . Максимальное значение $F_i = 1$ будет при $X_i = 1, X_0 = 1$.

Возникает проблема: если параметр K является значимым, но его численное значение меньше других, то его влияние будет незаслуженно низким. Например, если у выпрямительно-инверторного преобразователя есть параметры «Минимальный угол открытия тиристоров» $\alpha_0 < 15$ эл. град. и «Регулируемый угол открытия тиристоров» $\alpha_p < 157$ эл. град., то по расчету α_p будет оказывать большее влияние, чем α_0 , а на самом деле наоборот. Таким образом, желательна дополнительная нормализация. Например, привести углы открытия тиристоров в процентах от максимально ожидаемого значения.

Для повышения эффективности метода также возможен подбор размерности. Например, у тягового электродвигателя ток меняется в пределах 0–1 200 А, напряжение в пределах 0–1 000 В, а ступени ослабления поля от 0 до 4, то есть смысл представить последний параметр как 0, 300, 600, 900, 1 200.

После расчета значений функции активации по каждому событию в массиве S , следует просуммировать их по каждому классу в массиве $Class$:

```
For k = 1 To ClsMx
  For kk = 1 To EvnMx
```


Рассчитанный класс	Sigma	Параметры			
		1	2	3	4
Класс 1	0,1	500	800	900	
Вероятность принадлежности	Класс 1	Класс 3	Класс 4	Класс 2	Класс 5
	71,96%	27,20%	0,83%	0,00%	0,00%

Рис. 2. Вывод результатов расчета

Fig. 2. Output of calculation results

```

If Class(k, 0) = S(kk, 0) Then
  Class(k, 1) = Class(k, 1) + S(kk,
PrmMax)
End If
Next kk
Class(k, 1) = Class(k, 1)
Next k

```

В рассматриваемой методике класс принадлежности определяется максимальным значением суммы ΣF_i , но интересно видеть и ближайшие классы. Для этого в программе выполнена сортировка классов, которые заносятся в массив *ClassSrt*. Класс, соответствующий первому элементу, считается классом принадлежности диагностируемого события X_0 . Дополнительно для возможности анализа выводятся отсортированные данные *ClassSrt* как процент суммы ΣF_i класса к общей сумме $\Sigma \Sigma F_i$ (рис. 2):

```

ss = 0
For k = 1 To ClsMx
  ss = ss + ClassSrt(k, 1)
Next k
For k = 1 To ClsMx
  ClassSrt(k, 1) = ClassSrt(k, 1) / ss

```

```
Next k
```

Все действия с массивами (кроме ввода и вывода информации) оформлены как функция, возвращающая значение true при корректном завершении расчета:

```
Function RBFUniversal(S, EvnMx, PrmMx, Class,
ClassSrt, ClsMx, PrmMax, Sigma) As Boolean.
```

Весь описанный процесс также оформлен как функция:

```
Function RBFStat() As Boolean
```

для возможности многоитерационных расчетов: сама программа Sub AAA() запускается по одному из возможных вариантов по задаваемому вручную значению варианта Zdn. При Zdn = 1 запускается вариант с одним расчетом, остальные – многоитерационные.

Факторный анализ

В алгоритме ширина окна по умолчанию $\sigma = 0,1$. Многоитерационным расчетом для рассмотренного примера получена зависимость процента соответственно классу при различных значениях σ (рис. 3). При всех значениях σ соответствие было правильным – классу 1. Но про-

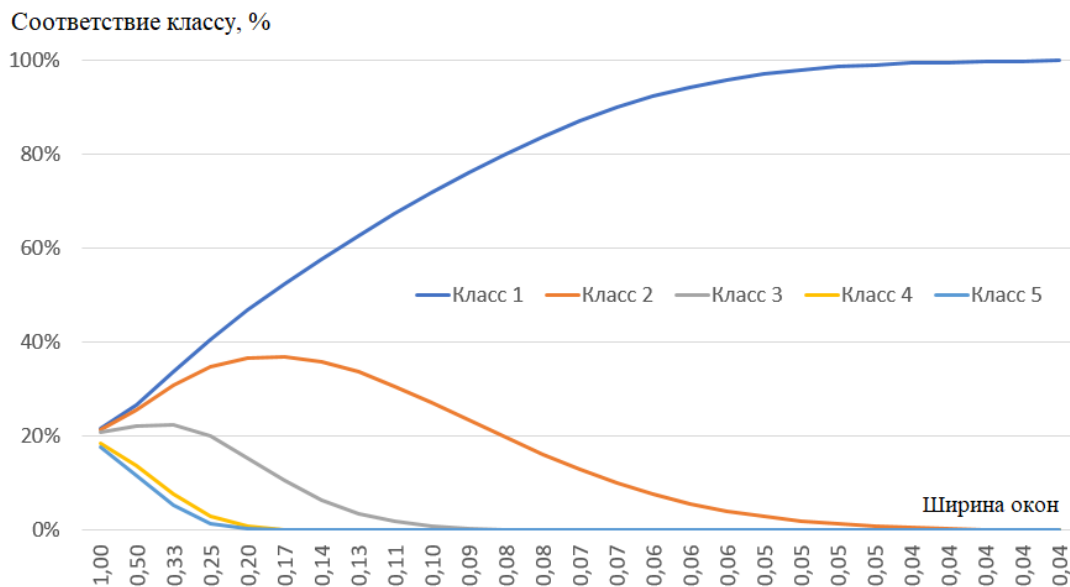


Рис. 3. Влияние ширины окна на результаты расчета

Fig. 3. The influence of window width on calculation results

цент соответствия (по сути, вероятность принадлежности классу 1) существенно рос и достиг 99,8 % при $\sigma = 0,04$. При $\sigma = 0,1$ соответствие было 77 %, что тоже существенно.

Проверено влияние неравномерности выборок. В предыдущих примерах у каждого из пяти классов было семь событий. На рис. 4 показано изменение соответствия классам при увеличении событий от 7 до 37 в классе 1, которому и принадлежит диагностируемое событие. Процент соответствия растет. На рис. 5 число событий растет у альтернативного класса 2. В результате происходит смена диагностируемого класса. Та-

ким образом, размер выборки влияет на диагноз: желательно брать выборки одинаковых размеров. Однако, если есть четкое соответствие диагностируемого события классу, то тогда влияния нет.

Диагностирование технического состояния

Рассмотрен пример диагностирования четырех тяговых электродвигателей (ТЭД) типа НБ-514Е четырехосной секции локомотива серии ЗЭС5К. Для этого создано пять классов. Первый – нормальная работа двигателей, когда разброс токов не более 5 % (табл. 1), еще четыре – отказы ТЭД, когда их ток примерно в 2

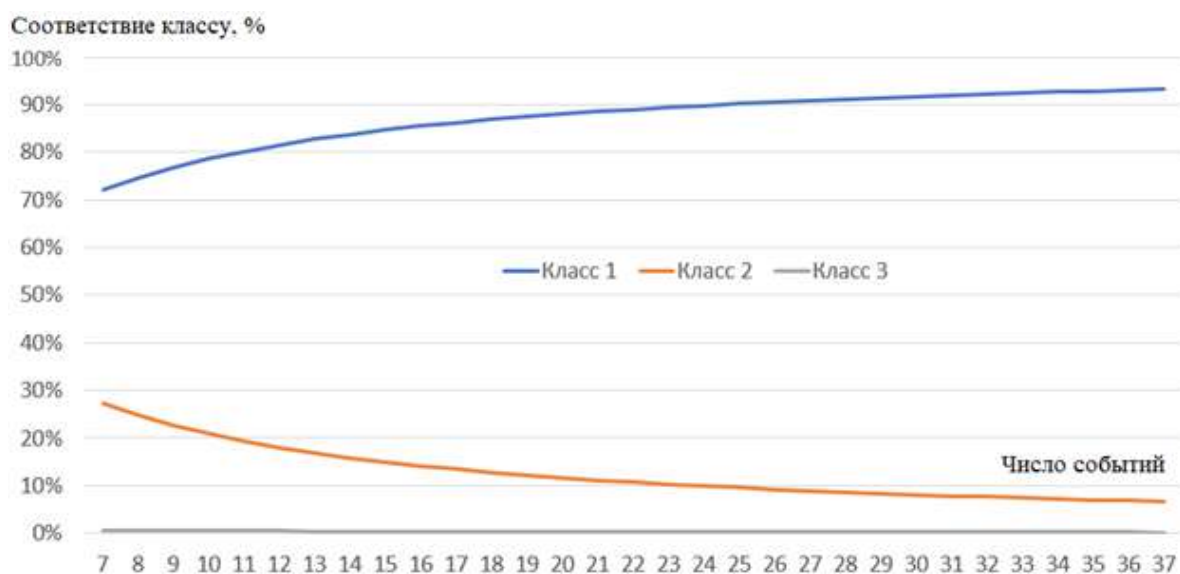


Рис. 4. Зависимость соответствия классу от числа событий в Классе 1
Fig. 4. Dependence of class compliance on the number of events in Class 1

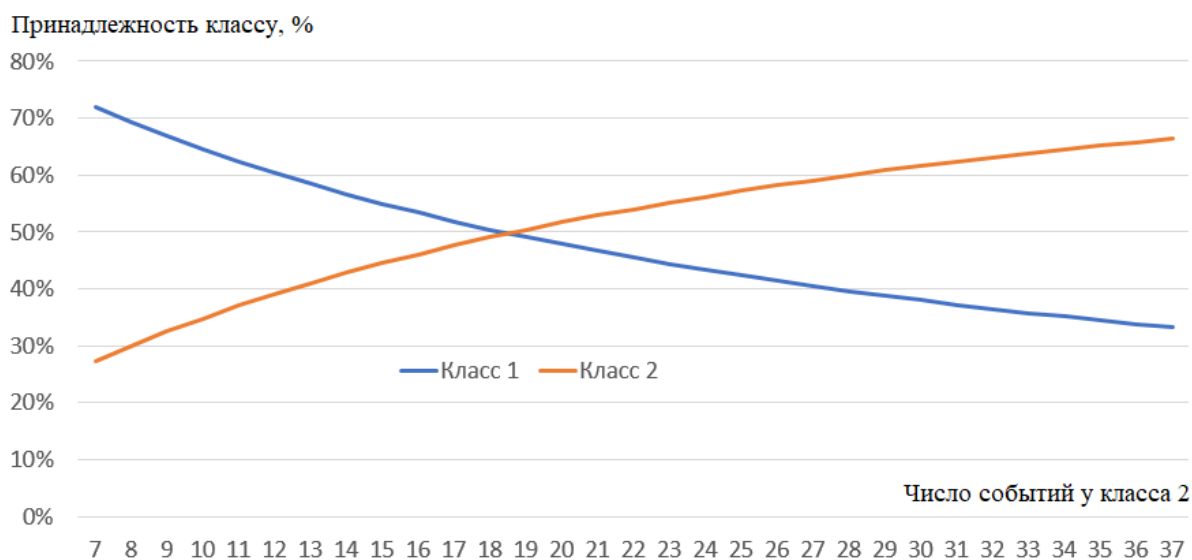


Рис. 5. Зависимость соответствия классу от числа событий в Классе 2
Fig. 5. Dependence of class compliance on the number of events in Class 2

раза меньше, чем у других (табл. 2). Для каждого класса создано по десять событий (всего 50), в каждом из которых данные имеют случайный разброс. При этом важно не абсолютное значение тока, а их соотношение у ТЭД.

Во всех случаях диагностирование было верным (табл. 3). Первые пять примеров – все ТЭД исправны. Вероятность принадлежности к классу «норма» – 77,9 %. Остальные примеры – это отказы разных ТЭД. Причем ток отказавшего ТЭД отличался не в 2 раза, как в обучающей выборке, а на разные значения. Например, в примере № 10 отличие тока ТЭД 3 – на 30 %. В результате и принадлежность классу отказа ТЭД 3 ниже – 62,4 %.

Приведенные примеры подтверждают возможность диагностирования отказа. Но наибольший эффект дает диагностирование предотказного состояния с предотвращением отказа во время планового ТОиР. В табл. 4 и на

рис. 6 приведены зависимости принадлежности к классам «норма» и «отказ ТЭД 1» в зависимости от значения тока первого ТЭД. При половине тока (500 А) процент отнесения к отказу – 94,51 %, а при нулевом токе – 99,99 %. Таким образом, предотказное состояние можно диагностировать по отрицательной динамике принадлежности к классу «норма». Дополнительно выполнен анализ эффективности метода при наличии двух и более отказов. На рис. 7 приведены результаты расчета для одновременного отказа ТЭД 1 и 2. Полученный результат оказался положительным: метод определил неисправное состояние и правильно классифицировал отказ. Графики отказов ТЭД 1 и 2 неодинаковые, так как их отказы заданы несовпадающими выборками. На рис. 8 приведены результаты расчета для одновременного отказа ТЭД 1, 2 и 3. Полученный результат также оказался положительным.

Таблица 1. Исходные данные при исправных тяговых электродвигателях

Table 1. Initial data for serviceable traction motors

Номер события Number of event	Токи диагностируемых тяговых электродвигателей, А Currents of diagnosed traction electric motors, А			
	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4
1	800	810	790	800
2	900	920	800	810
3	500	520	510	500
4	450	455	445	455
5	850	860	840	855
6	700	700	700	700
7	750	775	745	755
8	830	844	820	835
9	950	970	960	955
10	1 100	1 150	1 050	1 120

Таблица 2. Исходные данные при неисправном ТЭД 3

Table 2. Initial data for faulty TEM (traction electric motor 3)

Номер события Number of event	Токи диагностируемых тяговых электродвигателей, А Currents of diagnosed traction electric motors, А			
	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4
1	800	810	350	800
2	900	920	400	810
3	500	520	225	500
4	450	455	200	455
5	850	860	500	855
6	700	700	350	700
7	750	775	350	755
8	830	844	400	835
9	950	970	480	955
10	1 100	1 150	600	1 120

Таблица 3. Расчет принадлежности к классам тяговых электродвигателей

Table 3. Calculation of traction motor class classification

№ события Event №	Токи диагностируемых тяговых электродвигателей, А Currents of diagnosed traction electric motors, A				Принадлежность к классам, % Belonging to classes				
	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4	Норма	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4
1	500	500	500	500	77,90	5,05	3,78	3,80	9,47
2	850	840	860	855	77,90	5,15	4,55	3,34	9,02
3	300	300	300	300	77,90	5,05	3,78	3,80	9,47
4	530	540	550	560	77,90	7,25	7,00	4,26	3,40
5	1 200	1 190	1 170	1 195	77,90	4,47	3,75	4,47	8,96
6	500	1 000	1 000	1 000	5,26	95,00	0,03	0,05	0,15
7	500	800	790	820	19,64	79,00	0,23	0,35	0,62
8	100	700	710	720	0,06	99,94	0,00	0,00	0,00
9	833	400	850	840	3,25	0,04	96,66	0,02	0,02
10	1 000	1 100	700	1 050	34,38	1,38	1,58	62,41	1,58
11	777	800	750	500	22,51	0,44	0,19	0,51	76,34

Таблица 4. Расчет принадлежности ТЭД 1 к неисправному классу

Table 4. Calculation of the belonging of TEM 1 to the faulty class

№ события Event №	Токи диагностируемых тяговых электродвигателей, А Currents of diagnosed traction electric motors, A				Принадлежность к классам, % Belonging to classes				
	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4	Норма Norm	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4
1	1 000	1 000	1 000	1 000	77,76	5,04	3,77	3,97	9,45
2	900	1 000	1 000	1 000	74,56	13,35	2,45	2,76	2,45
3	800	1 000	1 000	1 000	60,97	31,93	1,35	1,56	4,19
4	700	1 000	1 000	1 000	36,98	59,91	0,55	0,68	1,89
5	600	1 000	1 000	1 000	15,78	83,26	0,15	0,21	0,60
6	500	1 000	1 000	1 000	5,26	94,51	0,03	0,05	0,15
7	400	1 000	1 000	1 000	1,55	98,40	0,03	0,01	0,01
8	300	1 000	1 000	1 000	0,43	99,88	0,00	0,00	0,01
9	200	1 000	1 000	1 000	0,12	99,88	0,00	0,00	0,00
10	100	1 000	1 000	1 000	0,03	99,97	0,00	0,00	0,00
11	0	1 000	1 000	1 000	0,01	99,99	0,00	0,00	0,00

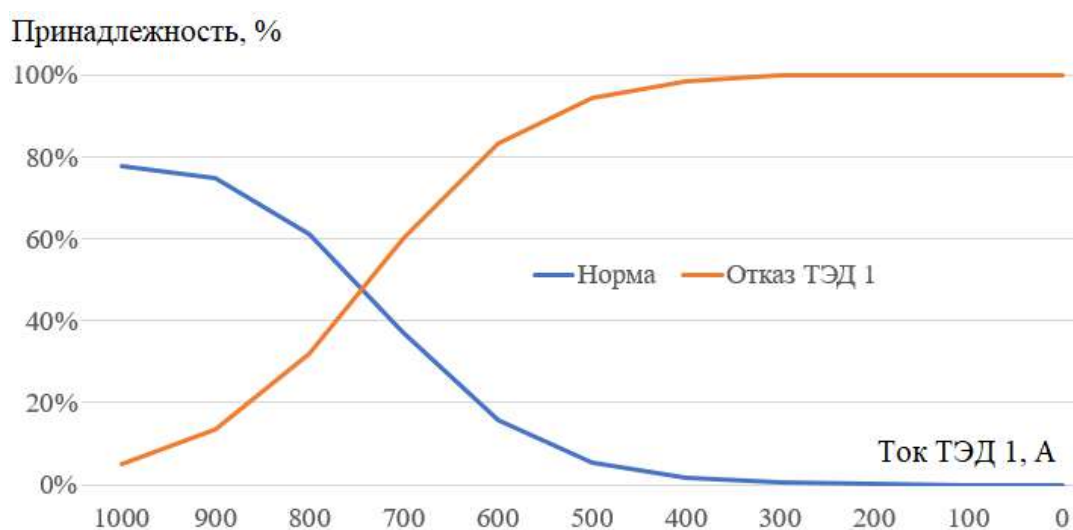


Рис. 6. Зависимость соответствия классам «норма» и «ТЭД 1» от разброса токов

Fig. 6. Dependence of compliance with the classes «norm» and «TED 1» on the spread of currents

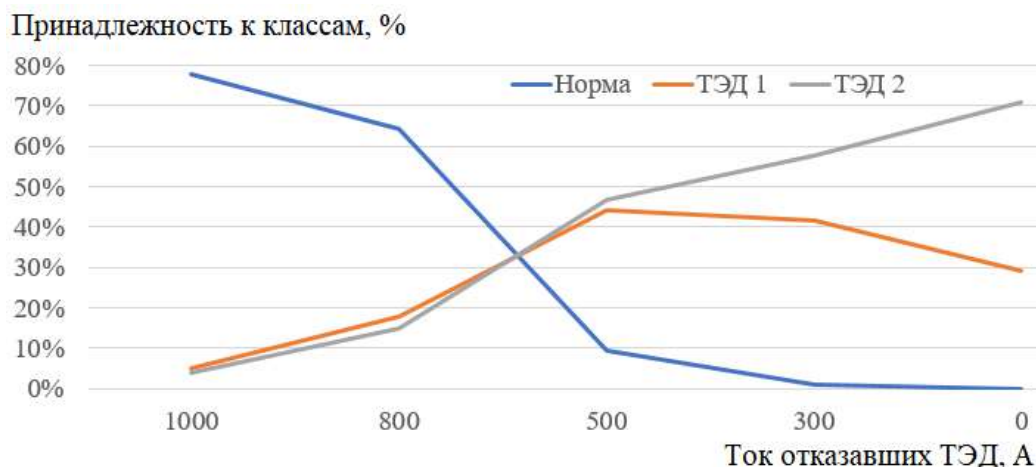


Рис. 7. Зависимость соответствия классам при отказах ТЭД 1 и 2
 Fig. 7. Dependence of compliance with classes in case of failures of TED 1 and 2

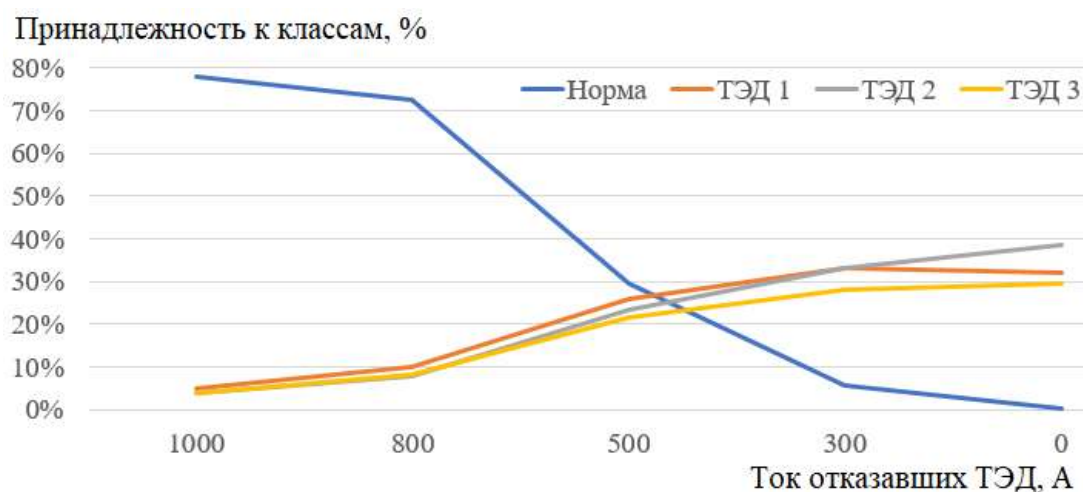


Рис. 8. Зависимость соответствия классам при отказах ТЭД 1, 2 и 3
 Fig. 8. Dependence of compliance with classes in case of failures of TEM 1, 2 and 3

Заключение

Применение RBF-сетей может быть эффективным при диагностировании отказов однотипного оборудования локомотивов, что доказано на примере параллельно работающих ТЭД с помощью специально разработанной программы на алгоритмическом языке VBA в среде MS Excel. Разработанная программа может быть инкапсулирована в АСУ ТОиР для ее использова-

ния как диагностической. При этом реализуется принцип постоянного самообучения по мере накопления статистических данных.

Полученные результаты позволяют автору в дальнейшей своей научно-практической работе использовать разработанный метод для его инкапсуляции в АСУ ТОиР.

Список литературы

1. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. Введ. 2022–01–01. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 40 с.
2. Горский А.В., Воробьев А.А. Надежность электроподвижного состава. М. : Маршрут, 2005. 303 с.
3. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава / В.А. Гапанович, В.Е. Андреев, Митрохин Ю.В. и др. М. : ИРИС-ГРУПП, 2012. 575 с.
4. Автоматизированная система управления локомотивным хозяйством. АСУТ / И.К. Лакин, Ю.В. Смирнов, А.Ю. Тимченко и др. М. : Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий, 2002. 514 с.
5. Шабалин Н.Г. Организация эксплуатации и технического обслуживания тягового подвижного состава с использованием современных информационных технологий : дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 171 с.

6. Пустовой И.В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2018. 181 с.
7. Семёнов А.П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2021. 379 с.
8. Грачев В.В. Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2019. 434 с.
9. Аболмасов А.А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания : дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 180 с.
10. Лакин И.К., Пустовой И.В., Аболмасов А.А. Автоматизированная система управления эксплуатационным жизненным циклом локомотивов // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава : тр. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Красноярск, 2020. С. 223–242.
11. Ratchev S. Cyber Physical Production Systems // Connected Everything : сайт. URL : <https://connectedeverything.ac.uk/wp-content/uploads/2018/06/cyber-physical-production-systems.pdf> (Дата обращения 07.06.2024).
12. Лакин И.И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 195 с.
13. Хромов И.Ю. Анализ влияния режимов эксплуатации на техническое состояние локомотивов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 187 с.
14. Мельников В.А. Совершенствование методов диагностирования тепловозов 2ТЭ116У с применением данных бортовых систем управления : дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 210 с.
15. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К.В. Липа, А.А. Белинский, В.Н. Пустовой и др. М. : Локомотивные Технологии, 2015. 212 с.
16. Moody J., Darken C.J. Fast Learning in Networks of Locally-Tuned Processing Units // Neural Computation. 1989. Vol. 1. Iss. 2. P. 281–294. DOI:10.1162/neco.1989.1.2.281.
17. Сеть радиальных базисных функций // Распознавание : сайт. URL : http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Сеть_радиальных_базисных_функций (Дата обращения 07.06.2024).
18. Проектирование RBF-сети в MS Excel // Rutube : сайт. URL : <https://rutube.ru/video/d259ee0113d687e0961a1cbfe83eb32e/> (Дата обращения 07.06.2024).
19. Уокенбах Д. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA. М. [и др] : Диалектика, 2012. 944 с.
20. Справочник по VBA для Excel // Microsoft Learn : сайт. URL : <https://learn.microsoft.com/ru-ru/office/vba/api/overview/excel> (Дата обращения 07.06.2024).

References

1. GOST R 27.102-2021. Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob'ekta. Terminy i opredeleniya [State Standard R 27.102-2021. Dependability in technics. Dependability of item. Terms and definitions]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii Publ., 2021. 40 p.
2. Gorskii A.V., Vorob'ev A.A. Nadezhnost' elektropodvizhnogo sostava [Reliability of electric rolling stock]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 303 p.
3. Gapanovich V.A., Andreev V.E., Mitrokhin Yu.V., Yagovkin A.N., Ivanov K.V., Alferov V.Yu., Kiselev V.I., Lakin I.K., Ivanov A.A. Eksploatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie podvizhnogo sostava [Operation and maintenance of rolling stock]. Moscow: IRIS-GRUPP Publ., 2012. 575 p.
4. Lakin I.K., Smirnov Yu.V., Timchenko A.Yu., Bushuev I.V. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya lokomotivnym khozyaistvom. ASUT [Automated locomotive management system. ALMS]. Moscow: Otrasevoi tsentr vnedreniya novoi tekhniki i tekhnologii Publ., 2002. 514 p.
5. Shabalin N.G. Organizatsiya ekspluatatsii i tekhnicheskogo obsluzhivaniya tyagovogo podvizhnogo sostava s ispol'zovaniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologii [Organization of operation and maintenance of traction rolling stock using modern information technologies]. Ph.D.'s theses. Moscow, 1999. 171 p.
6. Pustovoi I.V. Razrabotka informatsionno-dinamicheskoi modeli upravleniya servisnym tekhnicheskim obsluzhivaniem i remontom lokomotivov [Development of an information-dynamic management model for maintenance and repair of locomotives]. Ph.D.'s theses. Omsk, 2018. 181 p.
7. Semenov A.P. Model' upravleniya zhizennym tsiklom lokomotivov s ispol'zovaniem sovremennykh metodov tekhnicheskogo diagnostirovaniya [Model of locomotive life cycle management using modern methods of technical diagnostics]. Doctor's theses. Moscow, 2021, 379 p.
8. Grachev V.V. Nauchnye osnovy primeneniya metodov intellektual'nogo analiza dannykh dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov [Scientific bases of application of data mining methods for monitoring the technical condition of locomotives]. Doctor's theses. Saint Petersburg, 2019. 434 p.
9. Abolmasov A.A. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem tyagovogo podvizhnogo sostava v usloviyakh servisnogo obsluzhivaniya [Technical state management of the traction rolling stock in the conditions of service maintenance]. Ph.D.'s theses. Moscow: MIIT, 2017. 180 p.
10. Lakin I.K., Pustovoy I.V., Abolmasov A.A. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya ekspluatatsionnym zhizennym tsiklom lokomotivov [Automated control system for the operational life cycle of locomotives]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Eksploatatsiya i obsluzhivanie elektronnoy i mikroprotsessornoy oborudovaniya tyagovogo podvizhnogo sostava»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International participation «Operation and maintenance of electronic and microprocessor equipment of traction rolling stock»]. Krasnoyarsk, 2020, pp. 223–242.

11. Ratchev S. Cyber Physical Production Systems. Available at: [https:// connectedeverything.ac.uk/wp-content/uploads/2018/06/cyber-physical-production-systems.pdf](https://connectedeverything.ac.uk/wp-content/uploads/2018/06/cyber-physical-production-systems.pdf) (Accessed June 7, 2024).
12. Lakin I.I. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov po dannym bortovykh apparatno-programmykh kompleksov [Monitoring of the technical state of locomotives according to on-board hardware-software complexes]. Ph.D.'s theses. Moscow: МИТ, 2016. 195 p.
13. Khromov I.Yu. Analiz vliyaniya rezhimov ekspluatatsii na tekhnicheskoe sostoyanie lokomotivov [Analysis of the influence of operating modes on the technical condition of locomotives]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2021. 187 p.
14. Mel'nikov V.A. Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniya teplovozov 2TE116U s primeneniem dannykh bortovykh sistem upravleniya [Improvement of methods for diagnosing diesel locomotives 2TE116U using data from on-board control systems]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2022. 210 p.
15. Lipa K.V., Belinskii A.A., Pustovoi V.N. et al. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov. Teoriya i praktika [Monitoring of technical condition and operating modes of locomotives. Theory and practice]. Moscow: Lokomotivnye Tekhnologii Publ., 2015. 212 p.
16. Moody J., Darken C.J. Fast Learning in Networks of Locally-Tuned Processing Units. *Neural Computation*, 1989, vol. 1, iss. 2, pp. 281–294. DOI:10.1162/neco.1989.1.2.281.
17. Set' radial'nykh bazisnykh funktsii (elektronnyi resurs) [Network of radial basis functions (electronic resource)]. Available at: http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Сеть_радиальных_базисных_функций (Accessed June 7, 2024).
18. Proektirovanie RBF-seti v MS Excel (elektronnyi resurs) [RBF network design in MS Excel (electronic resource)]. Available at: <https://rutube.ru/video/d259ee0113d687e0961a1cbfe83eb32e/> (Accessed June 7, 2024).
19. Walkenbach J. Excel 2010: professional'noe programmirovaniye na VBA [Excel 2010: professional programming in VBA]. Moscow, Saint Petersburg, Kiev: Dialektika Publ., 2012. 944 p.
20. Spravochnik po VBA dlya Excel (elektronnyi resurs) [VBA Handbook for Excel (electronic resource)]. Available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/office/vba/api/overview/excel> (Accessed June 7, 2024).

Информация об авторах

Лакин Игорь Игоревич, кандидат технических наук, ведущий эксперт группы интеграции систем управления, диагностики, безопасности и радиосвязи, Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта, г. Москва; e-mail: Lakin16@mail.ru.

Information about the authors

Igor' I. Lakin, Ph.D. in Engineering Science, Leading Expert of the Control, Diagnostic, Safety and Radio Communication Systems Integration Group, Railway Engineering Center, Moscow; e-mail: Lakin16@mail.ru.

Математическое обеспечение для выбора сценария учебной программы в условиях цифровой железной дороги

Ю.М. Краковский✉, Е.А. Колисниченко, В.А. Начигин

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

✉yuri.krakovskiy@yandex.ru

Резюме

Создание в стране цифровой экономики, программ импортозамещения, совершенствование и внедрение IT и технологий искусственного интеллекта требуют модернизации, оптимизации и трансформации высшего образования. В ОАО «РЖД» в последние годы реализуется комплексный научно-технический проект «Цифровая железная дорога», предполагающий расширение цифровых технологий холдинга. «Цифровая железная дорога» включает развитие следующих IT-технологий: большие данные; промышленный интернет; технологии беспроводной связи, виртуальной и дополненной реальности; возможность использования современных и высокоэффективных методов диагностики, прогнозирования, а также обучения персонала. В связи с этим цифровизация железных дорог требует цифровой трансформации образования, а для этого необходимо повышение качества учебных программ, изменение их содержания по часам и читаемым дисциплинам. При обсуждении этих вопросов возможно создание нескольких сценариев учебных программ, поэтому возникает задача выбора лучшего из них. Математическое обеспечение содержит два непараметрических критерия (критерий Краскела – Уоллеса и критерий Уилкоксона – Манна – Уитни) для выбора сценария в терминах математической статистики. Для сравнения сценариев приведены пять показателей, значения которых определяют эксперты по стобальной шкале. Для «свертки» пяти показателей в один комплексный предложено использовать линейную модель с весовыми коэффициентами, которые рекомендовано определять по методу анализа иерархий с вычислением отношения согласованности. Данные исследования проведены применительно к специальности «Путь и путевое хозяйство». При апробации методики выбран один из трех рассматриваемых сценариев.

Ключевые слова

непараметрические критерии, метод анализа иерархий, экспертная информация, путь и путевое хозяйство, цифровая железная дорога

Для цитирования

Краковский Ю.М. Математическое обеспечение для выбора сценария учебной программы в условиях цифровой железной дороги / Ю.М. Краковский, Е.А. Колисниченко, В.А. Начигин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 143–152. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).143-152.

Информация о статье

поступила в редакцию: 03.09.2024 г.; поступила после рецензирования: 13.09.2024 г.; принята к публикации 16.09.2024 г.

Mathematical software for choosing a curriculum scenario in a digital railway environment

Yu.M. Krakovskii✉, E.A. Kolisnichenko, V.A. Nachigin

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉yuri.krakovskiy@yandex.ru

Abstract

The creation of a digital economy in the country, import substitution programs, improvement and implementation of information technologies and artificial intelligence technologies require the development, improvement and transformation of higher education. In recent years, Russian Railways has been implementing a comprehensive scientific and technical project «Digital Railway», which involves the development of digital technologies of the holding. The Digital Railway includes the development of IT technologies such as big data, industrial Internet, wireless communication technologies, virtual and augmented reality, the possibility of using modern and highly effective diagnostic and forecasting methods as well as personnel training. In this regard, digitalization of railways requires a digital transformation of education, and for this it is necessary to improve curricula, change their content by hours and disciplines taught. When discussing these issues, it is possible to create several scenarios for training programs, so the task arises of choosing the best one. The mathematical software contains two nonparametric criteria (the Kraskel – Wallace criterion and the Wilcoxon – Mann – Whitney criterion) for selecting a scenario in terms of mathematical statistics. To compare the scenarios, five indicators are given, whose values are determined by experts on a 100-point scale. To «convolve» five indicators into a single complex one, it is proposed to use a linear model with weighting coefficients, which are recommended to be determined using the method of hierarchy analysis with the calculation of the consistency ratio. These studies were conducted in relation to the specialty «Track and Track Facilities». When testing the methodology, one of the three scenarios under consideration was selected.

Keywords

nonparametric criteria, hierarchy analysis method, expert information, track and track facilities, digital railway

For citation

Krakovskii Yu.M., Kolisnichenko E.A., Nachigin V.A. Matematicheskoe obespechenie dlya vybora stsenariya uchebnoi programmy v usloviyakh tsifrovoi zheleznoi dorogi [Mathematical software for choosing a curriculum scenario in a digital railway environment]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 143–152. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).143-152.

Article Info

Received: September 3, 2024; Revised: September 13, 2024; Accepted: September 16, 2024.

Введение

В настоящее время в мире и в нашей стране большое внимание уделяется цифровизации экономики: создаются, развиваются и внедряются программы в различных сферах, включая промышленность, транспорт, сельское хозяйство и образование [1, 2]. Правительством Российской Федерации опубликована программа по цифровой экономике, которая последние годы совершенствуется и развивается. Создание в стране цифровой экономики, программ импортозамещения [3, 4], расширение и внедрение информационных технологий (ИТ) и искусственного интеллекта [5, 6] требуют развития и совершенствования цифровой трансформации высшего образования [7, 8].

Как правило, цифровая трансформация – это некий процесс изменения (преобразования) каких-то решений для выбранной сферы, когда для этих решений функции, обеспечивающие взаимодействие компонентов, поддерживающих принятие управленческих решений с учетом внешней среды, выполняются специальными цифровыми сервисами.

Процесс цифровизации в узконаправленном секторе – это использование программно-технического и алгоритмического обеспечения, структура которого содержит сервисы по выполнению различных операций и технологий для развития бизнес-процессов.

В этих целях широко используется прикладное программное обеспечение для организаций, предназначенное для автоматизации стратегий взаимодействия с заказчиками. Данное программное обеспечение называют системой управления взаимоотношениями с клиентами – CRM-системой. Эти системы повышают размер продаж, способствуют оптимизации маркетинговой деятельности компании и улучшают обслуживание потенциальных покупателей.

В настоящий момент в ОАО «РЖД» используется своя система взаимодействия с гру-

зоотправителями. Система интеллектуального управления движением обеспечивает доступ к актуальным данным транспорта и инфраструктуры, моделирование процессов строительства, эксплуатации и ремонта с привязкой ко времени и бюджетированию, а также планирование перевозок и сервисы комплексной диагностики, основанной на обслуживании и ремонте по фактическому состоянию транспортной инфраструктуры.

Суть цифровой трансформации образования – это достижение каждым обучаемым необходимых образовательных результатов за счет персонализации образовательного процесса на основе использования растущего потенциала цифровых технологий, включая применение методов искусственного интеллекта, средств дополненной и виртуальной реальности. Также обеспечивается развитие в образовательных организациях цифровой образовательной среды и общедоступного широкополосного доступа к интернету, работы с большими данными.

В ОАО «РЖД» в последние годы реализуется комплексный научно-технический проект «Цифровая железная дорога», предполагающий совершенствование цифровых технологий холдинга. «Цифровая железная дорога» включает развитие следующих ИТ-технологий: большие данные; промышленный интернет; технологии беспроводной связи, виртуальной и дополненной реальности; возможность использования современных и высокоэффективных методов диагностики и прогнозирования, а также обучения персонала.

Высшие учебные заведения железнодорожной отрасли откликнулись на вызовы времени (работы коллектива научно-исследовательской лаборатории «Информационные технологии транспорта» Сибирского государственного университета путей сообщения (г. Новосибирск) применительно к проекту «Цифровая железная дорога» [9, 10]).

Отметим также работу [11], в которой рассматривается целесообразность внедрения в учебный процесс электронных стимуляторов, включая практические и лабораторные занятия, а также самостоятельную работу студентов технических вузов. В работе описан поиск адекватных форм взаимодействия образования и производства, а также эффективные технологии и методы обучения.

Таким образом, цифровизация железных дорог требует цифровой трансформации высшего образования, а это, в свою очередь, требует совершенствования учебных программ, изменения их содержания по часам и читаемым дисциплинам. При обсуждении этих вопросов возможно создание нескольких сценариев учебных программ (СУП). В связи с этим возникает задача выбора лучшего из них.

Целью данной работы является создание математического обеспечения и методики выбора на его основе лучшего сценария учебной программы в условиях цифровой железной дороги.

Актуальность работы подтверждается также тем, что в ближайшие годы высшее российское образование переходит на новые стандарты, основанные на базовом и специальном образовании.

Математическое обеспечение для задачи выбора сценария учебной программы

Для повышения эффективности железнодорожных перевозок широко используется различное математическое обеспечение, технологии по повышению провозной и пропускной способностей пути, а также оценке рисков [12–14]. Математическое обеспечение

используется в задачах прогнозирования показателей [15–18], оптимизации, диагностики, мониторинга и надежности инфраструктуры пути [19–22].

Рассматривая задачу выбора СУП, будем опираться на критерии непараметрической статистики, которые не требуют знания вида функции распределения генеральной совокупности, а лишь предполагают ее непрерывность [23, 24]. В нашем случае рекомендуется применить критерий Краскела – Уоллеса. Этот критерий относится к ранговому однофакторному анализу, когда влияющий фактор содержит множество уровней. Влияющим фактором в нашем случае является структура и содержание СУП, а уровнями – сами сценарии.

Постановка задачи выбора СУП следующая:

1. Необходимо создать k сценариев учебной программы, j – номер сценария.

2. Предложить показатели (z_i), по которым будет происходить сравнение СУП. Здесь i – номер показателя, $i = 1, \dots, m$; m – число показателей.

3. Используя группу экспертов, необходимо определить значения по стобальной шкале выбранных показателей по каждому СУП (x_{ij}) (табл. 1), столбцы – это СУП, строки – значения показателей. Выбор стобальной шкалы обусловлен тем, чтобы по возможности отсутствовали совпадающие значения. Значений в столбце столько, сколько показателей, они рассматриваются как независимые выборочные значения.

4. Полученные значения (x_{ij}) записываются в табл. 2, но теперь эти значения упорядочены

Таблица 1. Значения показателей для сценариев учебных программ в виде баллов
Table 1. The values of the indicators for training program scenarios in the form of points

j	1	2	...	k
z_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1k}
z_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2k}
...
z_m	x_{m1}	x_{m2}	...	x_{mk}

Таблица 2. Упорядоченные значения показателей для сценариев учебных программ в виде баллов
Table 2. Ordered values of indicators for training program scenarios in the form of points

1	2	...	k
x_{i1}	x_{i2}	...	x_{ik}
y_{11}	y_{12}	...	y_{1k}
...
y_{m1}	y_{m2}	...	y_{mk}
X_1	X_2	...	X_k

ны, они записываются по возрастанию, поэтому мы изменили их обозначение (y_{ij}).

5. В нижней строке записываем средний балл по столбцам:

$$X_j = \sum_{i=1}^m \frac{y_{ij}}{m}, j = 1, \dots, k. \quad (1)$$

6. В табл. 3 записываем ранги (r_{ij}). В данном случае ранги – это числа натурального ряда. Они присваиваются значениям (y_{ij}) при условии, что эти значения объединяются в общую выборку, $N = k \cdot m$ – объем этой выборки. Тогда ранги – это числа в диапазоне от 1 до N , сумма рангов равна:

$$S_r = N \cdot (N+1) / 2. \quad (2)$$

В последней строке записываем суммы рангов по столбцам – R_j , при сложении которых получаем величину (2).

Таблица 3. Ранги для объединенной выборки
Table 3. Ranks for pooled sample

1	2	...	k
r_{i1}	r_{i2}	...	r_{ik}
r_{11}	r_{12}		r_{1k}
...
r_{m1}	r_{m2}		r_{mk}
$R_1 = \sum_i r_{i1}$	$R_2 = \sum_i r_{i2}$		$R_k = \sum_i r_{ik}$

7. Проводим обработку рангов по выбранному критерию Краскела – Уоллеса, расчетное значение которого имеет вид:

$$Q_r = (12 / (N \cdot (N+1))) \cdot \sum_j (R_j^2 / m) - 3 \cdot (N+1). \quad (3)$$

Основная гипотеза H_0 заключается в том, что данные по столбцам из табл. 1 принадлежат одному распределению (гипотеза об однородности), тем самым делается вывод, что при уровне значимости α выборки статистически неразличимы. Для это надо сравнить расчетное значение (3) с критическим, которым является квантиль для вероятности $(1-\alpha)$ известного распределения критерия.

При $m \geq 5$ и $k \geq 4$ этим распределением приближенно является распределение χ^2 с $(k-1)$ степенями свободы. Гипотеза H_0 отвергается, если $Q_r > X^2_{1-\alpha}$, где $X^2_{1-\alpha}$ – критическое значение при уровне значимости $(1-\alpha)$.

Так, если $\alpha = 0,05$, то при $k = 4$ $X^2_{1-\alpha} = 7,81$; при $k = 5$ $X^2_{1-\alpha} = 9,49$ [24].

В терминах предметной области, если выбрана гипотеза H_0 , то предложенные сценарии учебной программы статистически неразличимы.

Приведем критические значения критерия Краскела – Уоллеса ($Q_{кр}$) для различных m при $k = 3$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$: $m = 3$, $Q_{кр} = 5,60$; $m = 4$, $Q_{кр} = 5,69$; $m = 5$, $Q_{кр} = 5,78$. Гипотеза H_0 отвергается, если $Q_r > Q_{кр}$.

Рассмотрим практически важный случай при $k = 2$ (в табл. 1–3 по два столбца). В этом случае критерий Краскела – Уоллеса заменяется на критерий Уилкоксона – Манна – Уитни (ранговый критерий Манна, Уитни, основанный на критерии Уилкоксона), который заключается в следующем:

1. Подсчитываются суммы рангов: $R_x = \sum r_x$; $R_y = \sum r_y$; здесь r_x и r_y – ранги значений выборок X (первый столбец) и Y (второй столбец) в объединенной выборке;

2. Определяются величины:

$$\begin{aligned} U_x &= m^2 + (m \cdot (m+1)) / 2 - R_x; \\ U_y &= m^2 + (m \cdot (m+1)) / 2 - R_y; \\ U_x + U_y &= m^2. \end{aligned} \quad (4)$$

3. Используя значения (4), определяем расчетное значение критерия:

$$U_p = \min(U_x, U_y). \quad (5)$$

4. Если $U_p > U_{кр}(m, \alpha)$, то принимается гипотеза H_0 , иначе она отвергается. Здесь $U_{кр}(m, \alpha)$ – критическое значение критерия Уилкоксона – Манна – Уитни при уровне значимости α . Например, $U_{кр}(5; 0,05) = 4,0$ [24].

При любом k , если выбрана альтернативная гипотеза, лучшим сценарием является тот, у кого больше средний балл X_j из табл. 2.

Если выбрана гипотеза H_0 , то авторами предлагается дополнительное математическое обеспечение, которое заключается в следующем.

Создадим линейную модель, позволяющую вычислять значение комплексного показателя (d_j) для j -го СУП:

$$d_j = w_1 \cdot x_{1j} + w_2 \cdot x_{2j} + \dots + w_m \cdot x_{mj}, \quad (6)$$

где w_i – весовые коэффициенты, которые оценивают важность показателей. Нами рекомендуется для их получения метод анализа иерархий (МАИ); x_{ij} – значения предложенных показателей по каждому СУП (см. табл. 1) [25]. В этом случае значения показателей предполагаются неслучайными.

В этом методе эксперты создают обратно симметричную матрицу парных сравнений (A) размером ($m \times m$). Парные сравнения проводятся между показателями с точки зрения их важности. Элементы матрицы создают эксперты, которые работают как один коллектив. Специальной обработкой элементов матрицы находим весовые коэффициенты:

$$w_i = \frac{\sqrt[m]{\prod_{j=1}^m a_{ij}}}{\sum_{i=1}^m \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m a_{ij}}}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (7)$$

где a_{ij} – элементы матрицы A (парные сравнения показателей по важности, диагональные элементы равны 1). Первоначально эти элементы перемножаются по строкам, затем из произведения извлекается корень, полученные результаты нормируются, поэтому сумма коэффициентов равна 1 [26].

Хорошим преимуществом МАИ является возможность проверки на непротиворечивость (согласованность) парных сравнений экспертов через отношение согласованности (OS), которое должно быть не больше 0,1.

Отношение согласованности зависит от индекса согласованности, который зависит от максимального собственного значения, связанного с собственным вектором матрицы A :

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^m w_i B_i, \quad (8)$$

где w_i – весовые коэффициенты (7); B_i – суммы элементов матрицы по столбцам.

Если согласованность соблюдена, то весовым коэффициентам (7) можно доверять. Используя модель (6), полученные весовые коэффициенты и значения показателей (x_{ij}), найдем значения комплексных показателей по всем СУП. Далее выбираем СУП, для которого это значение максимально.

Методика выбора сценария учебной программы, использующая предложенное математическое обеспечение

Оформим задачу выбора СУП в виде двухэтапной методики. Каждый этап заканчивается выбором сценария учебной программы.

1. Создаем k СУП. Сценарии отличаются содержанием учебной программы по часам и дисциплинам.

2. Создаем и утверждаем показатели (z_i), по которым происходит сравнение СУП. Предложенное математическое обеспечение и созданная на его основе методика выбора СУП носят универсальный характер. Специфика, зависящая от специальности учебной программы, заключается в наименовании этих показателей и используемой экспертной информации. Показатели по своему назначению ориентированы на работодателя, что определило их формулировку. Дополнительно данная работа ориентирована на специальность «Путь и путевое хозяйство». С учетом этого авторами предлагаются следующие наименования показателей ($m = 5$):

– z_1 – уметь ставить и решать задачи по профессиональной деятельности в условиях социально-экономических ограничений;

– z_2 – наличие навыков по использованию знаний от дисциплин фундаментальной компоненты учебной программы при осуществлении профессиональной деятельности;

– z_3 – навыки использования итоговой аналитической, диагностической и нормативно-правовой информации в условиях полигонных и других современных технологий;

– z_4 – уметь использовать информацию, полученную с технических средств по диагностике и мониторингу путевого комплекса;

– z_5 – навыки поиска и использования нужной информации в существующих информационных ресурсах, а также умение использовать в работе стандартные программные продукты и приложения.

Учитывая важность экспертной информации в данном исследовании, сформулируем требования к экспертам. Эксперты работают как единый коллектив через обсуждения и согласования. При этом необходимо, чтобы среди экспертов были квалифицированные люди как от учебного процесса, так и от работодателей-практиков.

3. Подключая экспертов, создаем табл. 1, далее из табл. 1 создаем табл. 2, а из табл. 2 – табл. 3. Находим величины (1) и (2) и убеждаемся, что сумма сумм рангов равна величине (2).

4. В зависимости от числа СУП, выбираем непараметрический критерий: при $k > 2$ выбираем критерий Краскала – Уоллеса, а при $k = 2$ – критерий Уилкоксона – Манна – Уитни.

5. В зависимости от выбранного критерия находим расчетное и критическое значения. Расчетные значения определяются по формуле

(3) или (5). Исходя из соотношения этих значений, выбираем гипотезу H_0 или отвергаем ее.

6. Если при сравнении гипотеза H_0 отвергается, то выбираем СУП для которого средний балл X_j (1) максимален. На этом первый этап методики и сама задача выбора заканчивается, лучший СУП выбран. Если при сравнении расчетного и критического значений для выбранного критерия подтверждается гипотеза H_0 , то переходим ко второму этапу методики, который начинается с пункта 7.

7. Привлекая экспертов, создаем матрицу парных сравнений для показателей МАИ. Далее обрабатываем ее, находя весовые коэффициенты (7) и максимальное собственное значение (8). Находим индекс согласованности:

$$IS = (\lambda_{\max} - m) / (m - 1). \quad (9)$$

Далее находим отношение согласованности:

$$OS = IS / 1,12. \quad (10)$$

Проверяем условие $OS \leq 0,1$. Если условие выполнилось, то весовым коэффициентам можно доверять и далее использовать их в линейной функции (6).

8. Вычисляем для каждого СУП значения (6).

9. Выбираем СУП, для которого это значение максимально. На этом второй этап методики и сама задача выбора заканчивается, лучший СУП выбран.

Апробация методики выбора сценария учебной программы

Как уже отмечалось, проведем апробацию предложенной двухэтапной методики для специальности «Путь и путевое хозяйство». Дополнительно отметим, что данная апробация носит методический характер и имеет цель показать, как проводятся расчеты по созданной методике.

1. Создадим три СУП ($k = 3$). Эти сценарии необходимо обсудить на семинаре кафедры с привлечением работодателей-практиков.

2. Согласуем с экспертами предложенные нами показатели, по которым они будут оценивать созданные СУП.

3. Эксперты создают табл. 4 (аналог табл. 1), $k = 3$, $m = 5$. Это один из ответственных этапов, который определяет качество полученного результата. Эксперты изучают каждый СУП, анализируют показатели и для каждого из них

подбирают балл. Затем эти значения переносятся в таблицу для каждого СУП.

4. Создаем табл. 5 (аналог табл. 2). В нижней строке записываем средний балл по столбцам (1). Находим величину (2), при $N = k \cdot m = 15$, $S_r = 120$.

5. Создаем табл. 6 (аналог табл. 3).

Таблица 4. Значения показателей для сценариев учебной программы при апробации

Table 4. Values of indicators for training program scenarios while testing

j	1	2	3
z_1	82	69	79
z_2	66	76	83
z_3	78	89	67
z_4	61	54	58
z_5	73	57	63

Табл. 5. Упорядоченные значения показателей для сценариев учебной программы при апробации

Table 5. Ordered values of indicators for training program scenarios while testing

1	2	3
61	54	58
66	57	63
73	69	67
78	76	79
82	89	83
$X_1 = 72$	$X_2 = 69$	$X_3 = 70$

Таблица 6. Ранги для объединенной выборки при апробации

Table 6. Ranks for the pooled sample while testing

1	2	3
4	1	3
6	2	5
9	8	7
11	10	12
13	15	14
$R_1 = 43$	$R_2 = 36$	$R_3 = 41$

В последней строке записываем сумму рангов по столбцам, равную 120.

6. Вычисляем величину (3), $Q_r = 0,21$. Если бы было два сценария, то мы бы выбрали критерий Уилкоксона – Манни – Уитни и вычисляли на этом этапе величину (5). Находим критическое значение: $m = 5$, $\alpha = 0,05$, $Q_{кр} = 5,78$. Так как $Q_r = 0,21$ меньше $Q_{кр} = 5,78$, то гипотезу H_0 принимаем. Если бы эту гипотезу отвергли, то лучшим сценарием был бы первый (средний балл максимальный). В нашем случае переходим ко второму этапу методики (пункт 7).

Таблица 7. Матрица парных сравнений и результаты ее обработки
Table 7. The matrix of paired comparisons and the results of its processing

<i>A</i>	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	Π	K	W
z_1	1	0,5	2	4	3	12,0	1,644	0,263
z_2	2	1	3	5	4	120,0	2,605	0,417
z_3	0,5	0,333	1	3	2	1,000	1,000	0,160
z_4	0,25	0,2	0,333	1	0,5	0,008	0,384	0,062
z_5	0,333	0,25	0,5	2	1	0,083	0,608	0,098
B	4,083	2,283	6,833	15,000	10,500	Σ	6,241	1,0

7. Эксперты создают матрицу парных сравнений для показателей, далее она обрабатывается (табл. 7): Π – столбец произведений по строкам; K – столбец значений из корня пятой степени; W – столбец весовых коэффициентов (7); B – строка сумм по столбцам. При выборе парных суждений эксперты пользуются рекомендациями по их выбору, а также заранее обсуждают между собой важность показателей. Создание матрицы парных сравнений также ответственный этап, который определяет качество полученного результата.

Находим максимальное собственное значение (8), $\lambda_{\max} = 5,098$; находим индекс согласованности (9), $IS = 0,025$; находим отношение согласованности (10), $OS = 0,02$. Убеждаемся, что это отношение меньше 0,1. Весовым коэффициентам можно доверять, запишем их значения:

$$\begin{aligned} w_1 = 0,193; w_2 = 0,455; w_3 = 0,157; \\ w_4 = 0,054; w_5 = 0,141 \end{aligned} \quad (11)$$

8. Используя полученные весовые коэффициенты (11), а также значения показателей (см. табл. 4), найдем для каждого СУП значения функции (6):

$$d_1 = 0,263 \cdot 82 + 0,417 \cdot 66 + 0,160 \cdot 78 + 0,062 \cdot 61 + 0,098 \cdot 73 = 72,6;$$

$$d_2 = 0,263 \cdot 69 + 0,417 \cdot 76 + 0,160 \cdot 89 + 0,062 \cdot 54 + 0,098 \cdot 57 = 73,6;$$

$$d_3 = 0,263 \cdot 79 + 0,417 \cdot 83 + 0,160 \cdot 67 + 0,062 \cdot 58 + 0,098 \cdot 63 = 75,9.$$

9. Так как из трех полученных значений максимальное у третьего варианта (75,9), то

этот сценарий и рекомендуется к использованию. Задача выбора лучшего СУП завершена.

Заключение

Предложены и апробированы математическое обеспечение и двухэтапная методика для выбора СУП применительно к специальности «Путь и путевое хозяйство». Математическое обеспечение содержит два непараметрических критерия (критерия Краскела – Уоллеса и Уилкоксона – Манна – Уитни) для выбора сценария в терминах математической статистики. Для сравнения сценариев предложены пять показателей, значения которых определяют эксперты по стобалльной шкале. Для «свертки» пяти показателей в один комплексный предложено использовать линейную модель с весовыми коэффициентами. Эти коэффициенты рекомендовано определять по методу анализа иерархий с вычислением отношения согласованности.

При апробации методики выбран один из трех рассматриваемых сценариев, который и рекомендован как лучший. Данная работа полезна при переходе на новые учебные стандарты, которые используют базовую и специальную программы.

Дополнительно отметим, что наименования и число показателей можно изменять. При этом возможны показатели, учитывающие специфику учебного процесса в конкретном вузе.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Тебекин А.В. Анализ проблем и перспектив реализации планов импортозамещения в отраслях промышленности // *Транспортное дело России*. 2022. № 2. С. 159–165.
4. Абдикеев Н.М. Импортозамещение в высокотехнологичных отраслях промышленности в условиях внешних санкций // *Управленческие науки*. 2022. Т. 12. № 3. С. 53–69.
5. Авдеенко 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.

6. 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.
7. Алюнова Т.И., Алюнов Д.Ю. Трансформация образования в условиях цифровизации // Управление в условиях цифровизации социально-экономических процессов : сб. науч. ст. Чебоксары, 2020. С. 8–12.
8. Трудности и перспективы цифровой трансформации образования / А.Ю. Уваров, Э. Гейбл, И.В. Дворецкая и др. М. : НИУ ВШЭ, 2019. 344 с.
9. Волежанина И.С. Цифровая трансформация образования в сфере железнодорожного транспорта // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ.: Гуманитарные исследования. 2022. № 2 (13). С. 60–67.
10. Манаков А.Л., Хабаров В.И., Волежанина И.С. Интеграция образования, науки и производства по модели «Фабрика знаний» (на примере транспортной отрасли) // Качество. Инновации. Образование. 2019. № 5 (163). С. 12–19.
11. Исаева Т.Е., Малишевская Н.А. Реализация компетентного подхода в профессиональной подготовке обучающихся технических вузов через использование электронных стимуляторов // Вестн. Череповец. гос. ун-та. 2021. № 2 (101). С. 132–146.
12. Розенберг Е.Н., Аношкин В.В. Перспективы роста пропускной способности участков // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 4–7.
13. Сотников Е.А., Мехедов М.И., Холодняк П.С. Интенсификация роста загруженных направлений сети железнодорожных дорог // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 11–14.
14. Краковский Ю.М., Каргапольцев С.К., Начигин В.А. Моделирование перевозочного процесса железнодорожным транспортом: анализ, прогнозирование, риски. СПб. : ЛИТЕО, 2018. 240 с.
15. Базилевский М.П. Прогнозирование грузооборота железнодорожного транспорта по регрессионным моделям с детерминированными и стохастическими объясняющими переменными // Науч. ведомости Белгород. гос. ун-та. Сер.: Экономика. Информатика. 2019. Т. 46. № 1. С. 117–129.
16. Краковский Ю.М., Лузгин А.Н. Прогнозирование базовых показателей перевозочного процесса на основе сценарного подхода // Прикладная информатика. 2017. Т. 12. № 2 (68). С. 29–36.
17. Краковский Ю.М., Куклина О.Н. Бинарное прогнозирование динамических показателей на основе методов машинного обучения // Вестн. Томск. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 62. С. 50–55.
18. Краковский Ю.М., Крамынина Г.Н. Исследование сценариев прогнозирования грузооборота на железной дороге с учетом экспертной информации // System Analysis & Mathematical Modeling. 2023. Т. 5. № 4. С. 417–424.
19. Козлов П.А., Вакуленко С.П., Колокольников В.С. Расчет и оптимизация полигонов железнодорожного транспорта // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2017. № 3 (67). С. 96–101.
20. Краковский Ю.М., Даваадорж Б. Нечеткий численный вероятностный анализ для оценки показателей надежности рельсовых скреплений // Мир Транспорта. 2017. Т. 15. № 3 (70). С. 30–39.
21. Гула Д.Н., Головинский В.О. Прогнозирование технического состояния сложных технических комплексов на основе экспертной информации // Изв. Тул. гос. ун-та. Технические науки. 2021. № 3. С. 260–264.
22. Прогнозирование качества функционирования технического объекта с использованием машинного обучения / М.И. Корнилова, С.В. Бусыгин, В.Н. Ковальногов и др. // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4 (44). С. 152–158.
23. Холлендер М., Вульф Д. Непараметрические методы статистики. М. : Финансы и статистика, 1983. 518 с.
24. Закс Л. Статистическое оценивание. М. : Статистика, 1976. 598 с.
25. Саати Т.Л. Принятие решений : Метод анализа иерархий. М. : Радио и связь, 1993. 314 с.
26. Микони С.В. Теория и практика рационального выбора. М. : Маршрут, 2004. 462 с.

References

1. 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.
2. Starodubova A.A., Iskhakova D.D. Innovatsionnye strategii tsifroykh 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.
3. Tebekin A.V. Analiz problem i perspektiv realizatsii planov importozameshcheniya v otraslyakh promyshlennosti [Analysis of problems and prospects of implementation of import substitution plans in industries]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia], 2022, no. 2, pp. 159–165.
4. Abdikeev N.M. Importozameshchenie v vysokotekhnologichnykh otraslyakh promyshlennosti v usloviyakh vneshnikh sanktsii [Import substitution in high-tech industries in the context of external sanctions]. *Upravlencheskie nauki* [Managerial Sciences], 2022, vol. 12, no. 3, pp. 53–69.
5. 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.

6. Sivitskii D.A. Analiz opyta i perspektiv primeneniya iskusstvennykh neyronnykh 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.
7. Alyunova T.I., Alyunov D.Yu. Transformatsiya obrazovaniya v usloviyakh tsifrovizatsii [Transformation of education in the context of digitalization]. *Sbornik nauchnykh statei «Upravlenie v usloviyakh tsifrovizatsii sotsial'no-ekonomicheskikh protsessov»* [Proceedings «Management in the context of digitalization of socio-economic processes»]. Cheboksary, 2020, pp. 8–12.
8. Uvarov A.Yu., Geibl E., Dvoretzkaya I.V., Zaslavskii I.M., Karlov I.A., Mertsalova T.A., Sergomanov P.A., Frumin I.D. Trudnosti i perspektivy tsifrovoy transformatsii obrazovaniya [Difficulties and prospects of digital transformation of education]. Moscow: NIU VShE Publ., 2019. 344 p.
9. Volegzhanina I.S. Tsifrovaya transformatsiya obrazovaniya v sfere zheleznodorozhnogo transporta [Digital transformation of education in the field of railway transport]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya: Gumanitarnye issledovaniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University: Humanitarian Researches], 2022, no. 2 (13), pp. 60–67.
10. Manakov A.L., Khabarov V.I., Volegzhanina I.S. Integratsiya obrazovaniya, nauki i proizvodstva po modeli «Fabrika znaniy» (na primere transportnoi otrasli) [Integration of education, science and production according to the «Knowledge Factory» model (on the example of the transport industry)]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education], 2019, no. 5 (163), pp. 12–19.
11. Isaeva T.E., Malishevskaya N.A. Realizatsiya kompetentnostnogo podkhoda v professional'noi podgotovke obuchayushchikhsya tekhnicheskikh vuzov cherez ispol'zovanie elektronnykh stimulyatorov [The implementation of a competence-based approach in the professional training of students of technical universities through the use of electronic stimulants]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University], 2021, no. 2 (101), pp. 132–146.
12. Rosenberg E.N., Anoshkin V.V. Perspektivy rosta propusknoi sposobnosti uchastkov [Prospects for the growth of the capacity of sections]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway Transport], 2020, no. 3, pp. 4–7.
13. Sotnikov E.A., Mehedov M.I., Kholodnyak P.S. Intensifikatsiya rosta zagruzhennykh napravlenii seti zheleznykh dorog [Intensification of the growth of busy areas of the railway network]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2020, no. 3, pp. 11–14.
14. Krakovskii Yu.M., Kargapol'tsev S.K., Nachigin V.A. Modelirovanie perevozochnogo protsessa zheleznodorozhnym transportom: analiz, prognozirovanie, riski [Modeling of the transport process by rail: analysis, forecasting, risk]. Saint Petersburg: LITEO Publ., 2018. 240 p.
15. Bazilevskii M.P. Prognozirovanie gruzooborota zheleznodorozhnogo transporta po regressionnym modelyam s determinirovannymi i stokhasticheskimi ob'yasnyayushchimi peremennymi [Forecasting the freight turnover of railway transport using regression models with deterministic and stochastic explanatory variables]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* [Scientific Bulletin of the Belgorod State University. Series: Economics. Computer science], 2019, vol. 46, no. 1, pp. 117–129.
16. Krakovskii Yu.M., Luzgin A.N. Prognozirovanie bazovykh pokazatelei perevozochnogo protsessa na osnove stsenarnogo podkhoda [Forecasting of base indicators of transportation process based on a scenario approach]. *Prikladnaya informatika* [Journal of Applied Informatics], 2017, vol. 12, no. 2 (68), pp. 29–36.
17. Krakovskii Yu.M., Kuklina O.N. Binarnoe prognozirovanie dinamicheskikh pokazatelei na osnove metodov mashinnogo obucheniya [Binary forecasting of dynamic indicators based on machine learning methods]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of Tomsk State University. Management, computer engineering and computer science], 2023, no. 62, pp. 50–55.
18. Krakovskii Yu.M., Kramynina G.N. Issledovanie stsenariy prognozirovaniya gruzooborota na zheleznoi doroge s uchetoм ekspertnoi informatsii [Research of scenarios for forecasting freight turnover on the railway, taking into account expert information]. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2023, vol. 5, no. 4, pp. 417–424.
19. Kozlov P.A., Vakulenko S.P., Kolokol'nikov V.S. Raschet i optimizatsiya poligonov zheleznodorozhnogo transporta [Calculation and optimization of polygons of railway transport]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2017, no. 3 (67), pp. 96–101.
20. Krakovskii Yu.M., Davaadorzh B. Nechetkii chislennyi veroyatnostnyi analiz dlya otsenki pokazatelei nadezhnosti rel'sovykh skreplenii [Fuzzy numerical probabilistic analysis to assess the reliability of rail fasteners]. *Mir transporta* [World of Transport], 2017, vol. 15, no. 3 (70), pp. 30–39.
21. Gula D.N., Golovchinskii V.O. Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh kompleksov na osnove ekspertnoi informatsii [Forecasting the technical condition of complex technical complexes based on expert information]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletins of Tula State University. Technical sciences], 2021, no. 3, pp. 260–264.
22. Kornilova M.I., Busygin S.V., Koval'nogov V.N., Klyachkin V.N. Prognozirovanie kachestva funktsionirovaniya tekhnicheskogo ob'ekta s ispol'zovaniem mashinnogo obucheniya [Forecasting the quality of functioning of a technical object using machine learning]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems], 2023, no. 4 (44), pp. 152–158.
23. Hollander M., Wolfe D.A. *Neparametricheskie metody statistiki* [Nonparametric statistical methods]. Moscow: Finansy i Statistika Publ., 1983. 518 p.
24. Sachs L. *Statisticheskoe otsenivanie* [Statistische Auswertungsmethoden]. Moscow: Statistika Publ., 1976. 598 p.

25. Saati T.L. Prinyatie reshenii: Metod analiza ierarkhii [Decision-making: The method of hierarchy analysis]. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1993. 314 p.

26. Mikoni S.V. Teoriya i praktika ratsional'nogo vybora [Theory and practice of rational choice]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 462 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.

Колисниченко Елена Александровна, кандидат технических наук, проректор по учебной работе, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск; e-mail: kolisnichenko_ea@irgups.ru.

Начигин Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск; e-mail: nachiginv@yandex.ru.

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.

Elena A. Kolisnichenko, Ph.D. in Engineering Science, Vice Rector for Academic Affairs, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kolisnichenko_ea@irgups.ru.

Vladimir A. Nachigin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: nachiginv@yandex.ru.

Снижение осевых и радиальных деформаций тонкостенного оболочечного уплотнения

Ю.И. Белоголов✉

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

✉belogolov_yi@irgups.ru

Резюме

В статье рассматривается одно из перспективных направлений совершенствования уплотнительных соединений затворной арматуры – использование тонкостенных металлических уплотнений в затворах быстродействующих клапанов. Перекрытие потока рабочей среды в таких соединениях происходит со скоростью, достаточной для разрушения тонкостенного уплотнения. Изменение геометрических параметров уплотнения (толщины) приводит к потере положительных качеств по сравнению с другими типами соединений, поэтому достаточно важно обеспечить надежную работу затвора клапана при динамических (ударных) нагрузках без потери прочностных свойств. Ранее уже рассматривались вопросы снижения приведенной жесткости тонкостенного уплотнения за счет использования пластинчатых элементов. В таких конструктивных решениях появляется нагрузка со стороны рабочей среды на площадь пластинчатого элемента, которая может изменяться в широких пределах и влиять на надежность уплотнительного соединения. Для защиты тонкостенного металлического уплотнения пониженной жесткости в работе предлагается использование тонкостенных упругих ограничителей, которые будут предотвращать перегрузку затвора. Для проверки предлагаемой конструкции затвора произведено моделирование методом конечных элементов в модуле APM Structure 3D программного продукта НПЦ АРМ WinMachine. Полученные значения напряжений и перемещений в уплотнении с тонкостенными ограничителями и без них свидетельствуют о надежной работе затвора клапана, особенно при выходе за пределы условий эксплуатации. Использование осевого упора помогает предотвратить большие перегрузки уплотнения и в совокупности с тонкостенными ограничителями позволяет выполнить седло более тонкостенным, обеспечив минимизацию усилия герметизации в уплотнительном стыке.

Ключевые слова

арматуростроение, динамическое нагружение, затвор клапана, компенсация давления, осевой упор, тонкостенные уплотнения, ограничители деформации уплотнения

Для цитирования

Белоголов Ю.И. Снижение осевых и радиальных деформаций тонкостенного оболочечного уплотнения / Ю.И. Белоголов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 153–164. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).153-164.

Информация о статье

поступила в редакцию: 09.09.2024 г.; поступила после рецензирования: 16.09.2024 г.; принята к публикации: 19.09.2024 г.

Reduction of axial and radial deformations of thin-walled shell seals

Yu.I. Belogolov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉belogolov_yi@irgups.ru

Abstract

The article considers one of the promising directions of improvement of sealing connections of shut-off valves – the use of thin-walled metal seals in shutters of quick-acting valves. Shutting off of the flow of the working medium in such connections occurs at a speed sufficient for destruction of the thin-walled seal. Change of geometric parameters of sealing (thickness) leads to loss of positive qualities in comparison with other connections, therefore it is rather important to ensure reliable operation of the valve shutter under dynamic (impact) loads without loss of strength properties. Previously, the issues of reduced rigidity decrease of thin-walled seal due to the use of plate elements have already been considered. In such design solutions there is a load from the working medium on the area of the plate element, which can vary within wide limits and affect reliability of the sealing connection. To protect thin-walled metal seal of reduced rigidity, the article proposes to use thin-walled elastic limiters, which will prevent overload of the shutter. To test the proposed design of the shutter finite element modeling was performed in the AWP Structure 3D module of the AWP WinMachine software product from the Scientific and Production Center. The obtained stress values in a thin-walled seal with and without limiters indicate reliable operation of the valve shutter, especially when operating conditions are exceeded. The use of an axial stop helps prevent large seal overloads and, in combination with thin-walled stops, allows the seat to be made thinner, ensuring that the sealing force in the sealing joint is minimized.

Keywords

valve engineering, dynamic loading, valve closure, pressure compensation, axial thrust, thin-walled seals, seal deformation limiters

For citationBelogolov Yu.I. Snizhenie osevykh i radial'nykh deformatsii tonkostennogo obolochecnogo uplotneniya [Reduction of axial and radial deformations of thin-walled shell seals]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 153–164. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).153-164.**Article info**

Received: September 9, 2024; Revised: September 16, 2024; Accepted: September 19, 2024.

Введение

С ростом требований к уплотнительным соединениям по герметичности, значениям рабочих давлений и температур все большее применение в арматуростроении находят тонкостенные уплотнения в виде оболочек. Форма оболочечного элемента затвора цилиндрическая, реже – коническая.

Уплотнения такой формы могут быть использованы в различных уплотнительных соединениях: клапаны (в том числе быстродействующие), краны, фланцевые соединения и др. В качестве материала для таких уплотнений служит сталь, бронза и другие металлы. Согласно [1], в клапанных уплотнительных соединениях принято неподвижную часть затвора называть «седло», а подвижную «золотник». Принципиальная схема затвора клапана показана на рис. 1.

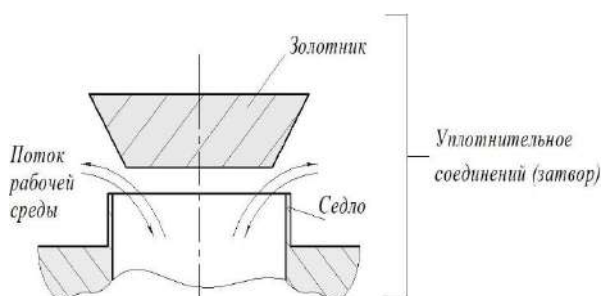


Рис. 1. Затвор клапана
Fig. 1. Valve shutter

Цель данной статьи – рассмотрение необходимости обеспечения сохранения упругих свойств тонкостенного уплотнения при его использовании в качестве седла без потери прочности соединения, особенно в условиях нестационарности давления.

Ударное нагружение клапана

Клапанные уплотнения, выполненные в виде тонкостенных металлических оболочек, эксплуатируются при динамических (ударных)

нагрузках [2–6]. Динамическое (ударное) нагружение клапана определяется прежде всего скоростью золотника [3] и жесткостью элементов затвора и может приводить к разрушению тонкостенного седла.

В [3] показано, что динамическая нагрузка F_{din} (максимальная), возникающая при контакте золотника и седла, определяется кинетической энергией E_k , частотой свободных колебаний ω и статической силой F_{st} , последняя из которых обеспечивает герметичность клапана:

$$F_{din} = F_{st} + \sqrt{F_{st}^2 + m^2 \cdot v^2 \cdot \omega^2}. \quad (1)$$

Параметр ω определяется массой и жесткостью элементов затвора и, согласно [2],

$$\omega^2 = \frac{c_1 + c_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{m}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим:

$$F_{din} = F_{st} + \sqrt{F_{st}^2 + m \cdot v^2 \cdot [c_1 + c_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)]}. \quad (3)$$

Перепишем (3), тогда формула примет вид:

$$F_{din} = F_{st} + \sqrt{F_{st}^2 + 2(E_k - E_\phi) \cdot [c_1 + c_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)]}, \quad (4)$$

где F_{st} – сила контактного взаимодействия элементов затвора; E_k – кинетическая энергия силовых элементов привода; E_ϕ – энергия, компенсирующая неровности торца оболочки; c_1 – жесткость подвижной части затвора; c_2 – жесткость тонкостенного седла; α – угол при вершине образующей конус золотника; φ – угол трения в затворе ($\varphi = \operatorname{arctg} f$), где f – коэффициент трения.

Параметры, входящих в формулу (4), показаны на рис. 2.

На рис. 3 представлен график свободных затухающих колебаний золотника массой m при единичном ударном нагружении седла клапана. Под действием F_{din} происходит соударение элементов затвора клапана при скорости v , что вызывает смещение на величину X . Последующее соударение элементов затвора в связи с потерей

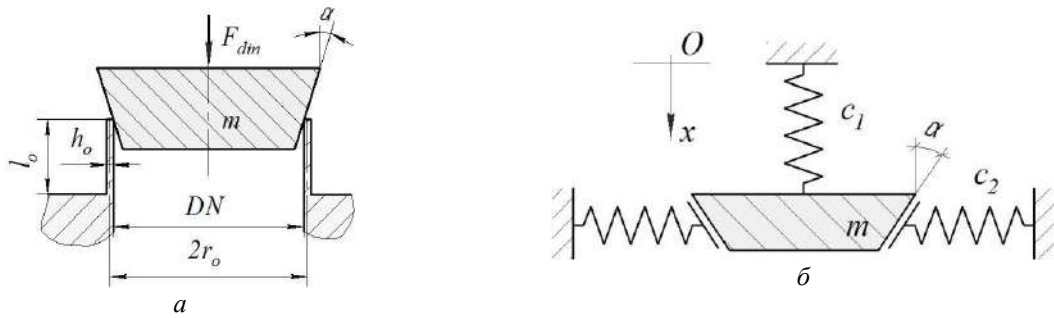


Рис. 2. Основные параметры затвора клапана:

a – затвор клапана с оболочечным седлом; b – жесткостная модель клапана; DN – диаметр условного прохода; h_0 – толщина оболочки; l_0 – высота оболочки; r_0 – радиус оболочки; F_{din} – динамическая (ударная) нагрузка; c_1 – приведенная жесткость привода; c_2 – радиальная жесткость оболочечного элемента; m – масса золотника

Fig. 2. Main parameters of the valve shutter:

a – valve shutter with a shell seat; b – valve rigidity model; DN – nominal bore diameter; h_0 – shell thickness; l_0 – shell height; r_0 – shell radius; F_{din} – dynamic (impact) load; c_1 – reduced actuator rigidity; c_2 – radial rigidity of the shell element; m – spool mass

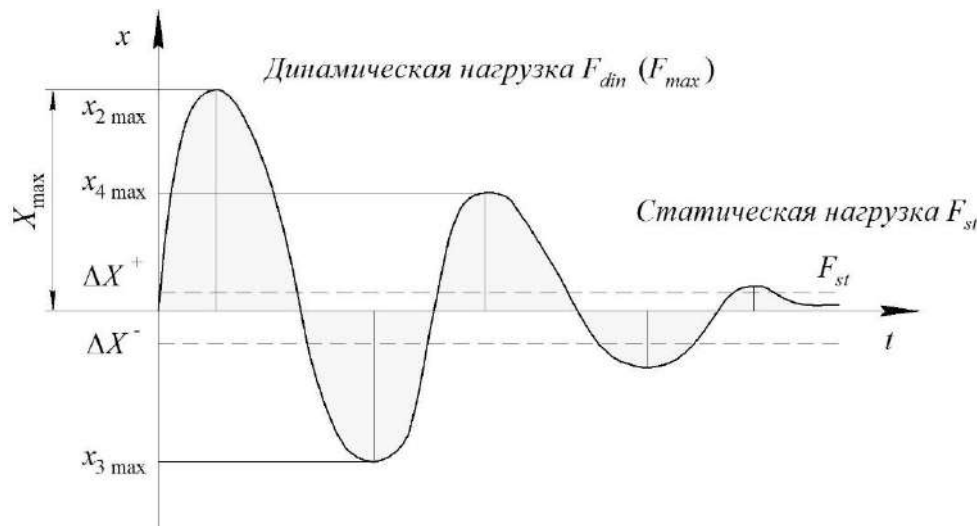


Рис. 3. График свободных затухающих колебаний:

x_{2max} , x_{3max} , x_{4max} – смещения золотника массой m при единичном ударном нагружении; ΔX^+ , ΔX^- – величины изменения амплитуды смещения; X_{max} – максимальная (начальная) амплитуда

Fig. 3. Graph of free damped oscillations:

x_{2max} , x_{3max} , x_{4max} – displacements of the spool with mass m under single impact loading; ΔX^+ , ΔX^- – values of change in displacement amplitude; X_{max} – maximum (initial) amplitude

ми на трение в зоне контакта происходит при меньших скоростях до тех пор, пока значение силы трения $F_{тр}$ не компенсирует значение кинетической энергии E_k золотника.

На рис. 4. показана схема взаимосвязи заданных и проектируемых параметров уплотнительного соединения, на которой определены пути снижения радиальных деформаций тонкостенного оболочечного уплотнения.

Из рис. 4 видно, что существуют два основных пути снижения чувствительности тонко-

стенного оболочечного уплотнения к изменению силового нагружения (ударным нагрузкам):

1. Управление рабочей средой (компенсация давления конструктивными решениями).
2. Управление геометрическими параметрами уплотнения (снижение приведенной жесткости, увеличение радиальной жесткости и др.).

Компенсация давления рабочей среды

В первом случае для снижения кинетической энергии соударения элементов затвора

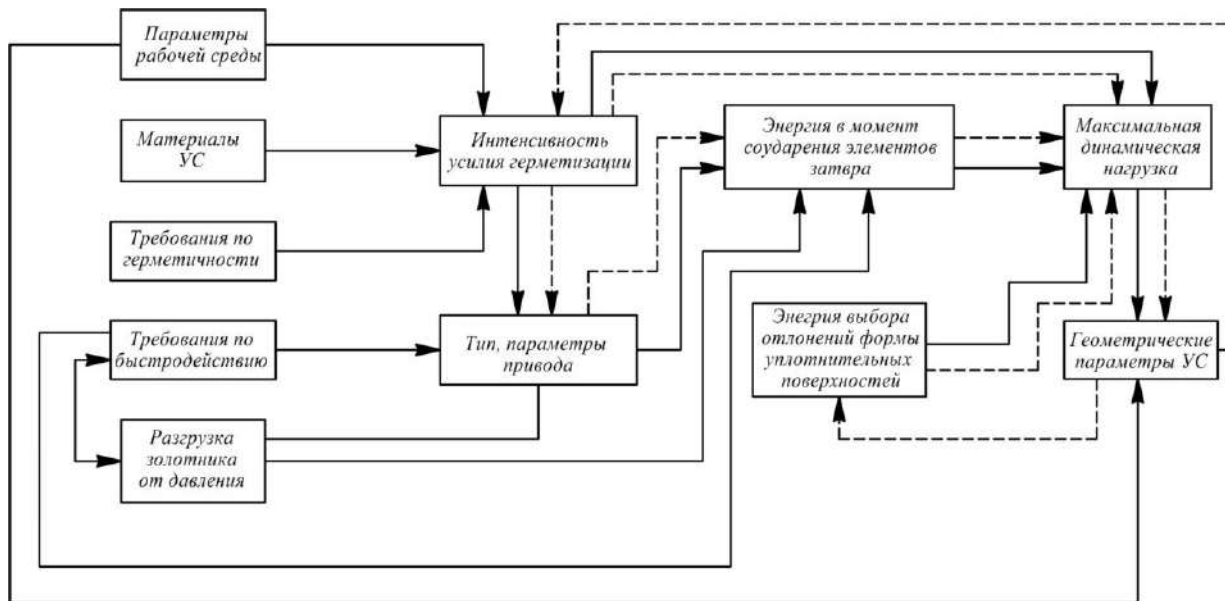


Рис. 4. Схема взаимосвязи заданных и проектируемых параметров: первичное проектирование (————), уточнение параметров (— — — — —)

Fig. 4. Scheme of the relationship between specified and designed parameters: primary design (————), clarification of parameters (— — — — —)

клапана может быть использована частичная либо полная компенсация давления рабочей среды на золотник.

Компенсация давления действующего на затвор клапана со стороны герметизируемой среды (разгрузка) [7, 8] позволяет снизить значения не только E_k , но и $F_{ст}$.

На рис. 5 представлены разгруженные от давления герметизируемой среды схемы клапанных соединений.

Для схемы *a* –

$$F_{пр} = q_{гер} \cdot \pi \cdot DN + \frac{\pi D_n^2}{4} \cdot p_p + F_{тр};$$

для схемы *б* –

$$F_{пр} = q_{гер} \cdot \pi \cdot DN + \frac{\pi(D_n - D_p)^2}{4} \cdot p_p + F_{тр};$$

для схемы *в* –

$$F_{пр} = q_{гер} \cdot \pi \cdot DN + \frac{\pi D_n^2}{4} \cdot p_p + F_{тр};$$

для схемы *г* –

$$F_{пр} = q_{гер} \cdot \pi \cdot DN + \left(\frac{\pi \cdot D_{ср}^2}{4} - \frac{\pi(D_n - D_p)^2}{4} \right) \cdot p_p + F_{тр}.$$

В качестве $D_{ср}$ принимается усредненное значение диаметра сальфона, а $(\pi \cdot D_{ср}^2)/4$ определяет эффективную площадь сальфона при разгрузке.

Для схемы *б* возможны три ситуации:

- $D_p < D_n$ – клапан разгружен частично;
- $D_p = D_n$ – клапан разгружен полностью;
- $D_p > D_n$ – клапан разгружен полностью.

Снижение осевой и радиальной деформаций оболочки

Во втором случае рассмотрим снижение радиальных деформаций оболочечного седла за счет применения ограничителей и упоров.

В [3] исследуются различные конструкции клапанов, где для снижения деформаций оболочечного седла используются осевые и радиальные упоры. Основным недостатком конструкций с осевым упором, представленных на рис. 6, является потеря герметичности соединения вследствие износа сопрягаемых элементов и образования зазора, который невозможно компенсировать [9, 10].

На рис. 7 [11–13] предлагается альтернативная конструкция уплотнительного соединения, в которой в качестве седла используется тонкостенная оболочка пониженной жесткости. Кроме того, для снижения радиальных деформаций седла в конструкции клапана предусмотрен осевой упор 5.

На рис. 7, *a* клапан показан в открытом состоянии, а на схеме *б* – в момент перекрытия потока рабочей среды. Прочность пластины 3

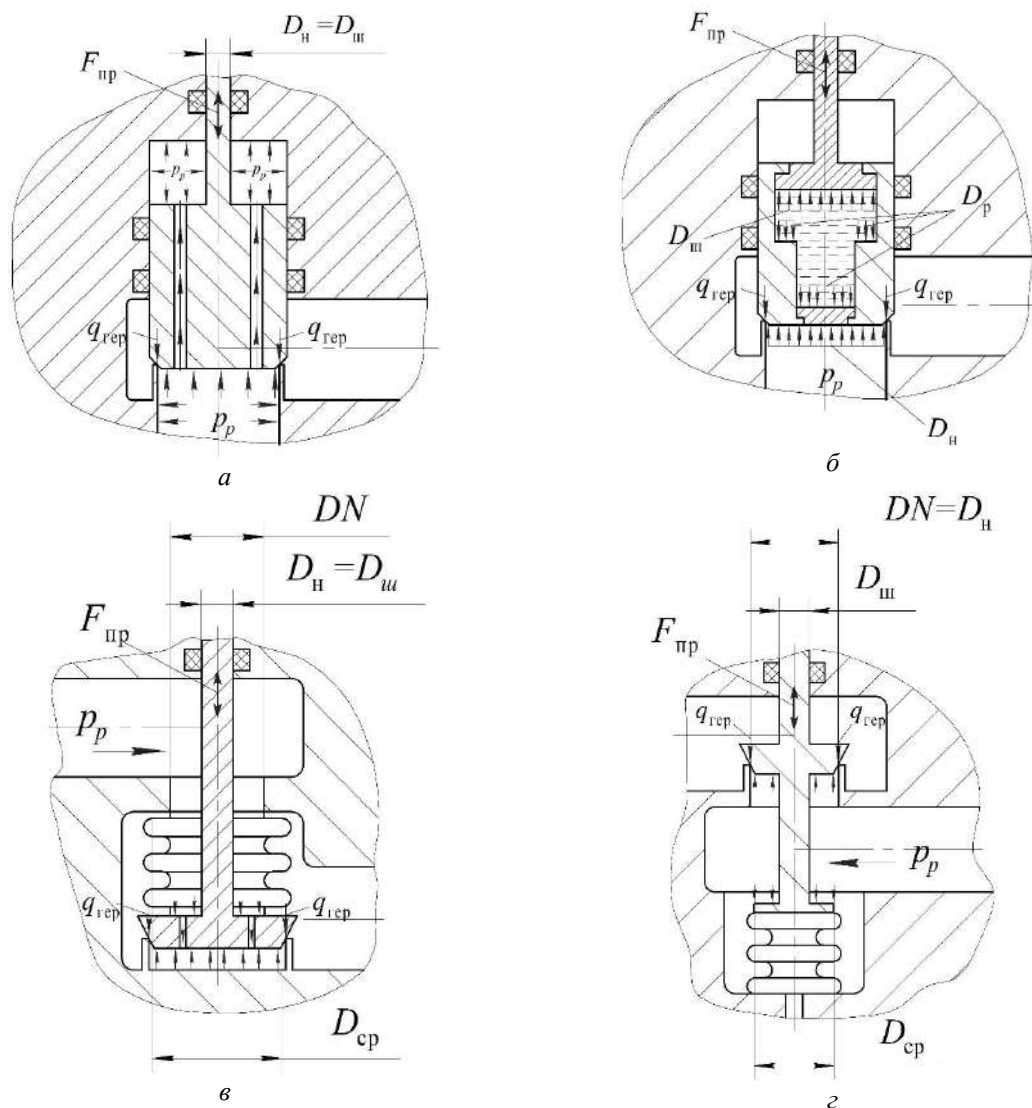


Рис. 5. Схемы разгруженного клапана:
а, б – поршневые; в, г – сильфонные

Fig. 5. Unloaded valve diagrams:
а, б – piston; в, г – bellows

тонкостенного уплотнения, нагруженной усилием F , со стороны привода обеспечивается упором 5 и упругими ограничителями 4.

Конструкция клапана обеспечивает минимизацию требуемого герметизирующего усилия за счет выполнения седла минимальной толщины, выбранной из условий прочности для расчетных условий эксплуатации, защиты от избыточной ударной динамической нагрузки за счет ограничения хода (упора) и от избыточного давления среды за счет наличия упругих упоров, тем самым повышая ресурс уплотнительного соединения и его надежность за счет сохранения

работоспособности при возникновении условий эксплуатации, превышающих расчетные.

Оценка напряженно-деформированного состояния уплотнительного соединения

Оценку напряженно-деформированного состояния предлагаемой конструкции выполним с использованием программного продукта APM WinMachine, разработанного научно-техническим центром АПМ. Расчет конструкции методом конечных элементов производится в модуле APM Structure 3D [14–16].

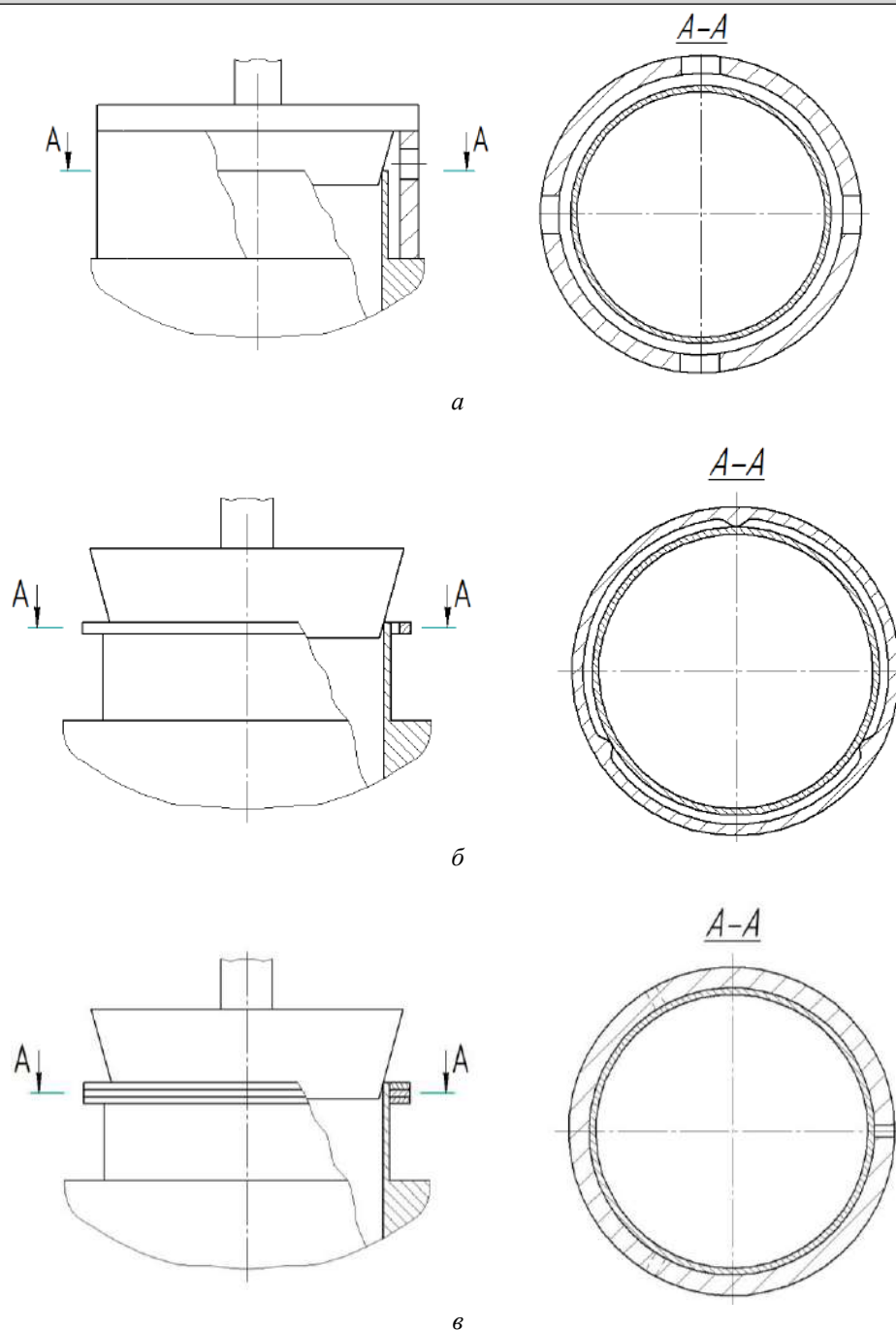


Рис. 6. Конструкции клапанных уплотнительных соединений:

а – с осевым упором; *б, в* – с радиальным упором

Fig. 6. Designs of valve sealing connections:

a – with axial stop; *b, c* – with radial stop

Далее представлены основные геометрические размеры (табл., рис. 7) затвора клапана и прикладываемая нагрузка, использованные при моделировании в APM Structure 3D. Нагрузка в 460 Н на седло клапана была определена из предварительного моделирования в данной системе с учетом того, что предел текучести

(упругости) равен 260 Н/мм^2 (что соответствует нагрузке 690 Н) и принятом коэффициенте запаса прочности $k = 1,5$.

В качестве материала тонкостенного седла и упругих ограничителей клапана выбрана бронза БрО5Ц5С5.

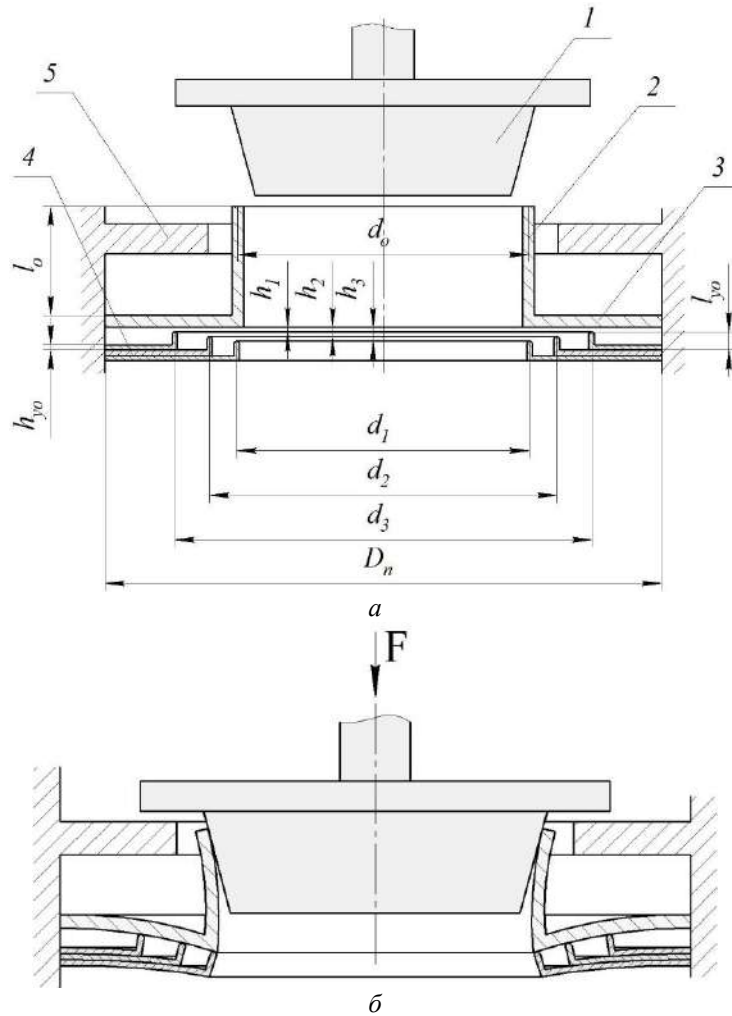


Рис. 7. Перспективная конструкция уплотнительного соединения:
 а – открытое положение клапана; б – закрыто положение клапана;
 1 – золотник; 2 – оболочка; 3 – пластина; 4 – упругий ограничитель; 5 – ограничитель хода (упор)

Fig. 7. Prospective design of a sealing joint:
 а – open position of the valve; б – closed position of the valve;
 1 – spool; 2 – shell; 3 – plate; 4 – elastic limiter; 5 – stroke limiter (stop)

Геометрические параметры седла клапана и нагрузки
 Geometrical parameters of the valve seat and loads

Нагрузка Load $F, Н$	Толщина Thickness $h_o / h_n / h_{yo}, мм$	Высота Height $l_o / l_{yo}, мм$	Диаметр Diameter $d_o / D_n, мм$	Угол конуса Cone angle $\alpha, град.$	Диаметр Diameter $d_1 / d_2 / d_3, мм$	Высота Height $h_1 / h_2 / h_3, мм$
460	1/1/1	20/5	39/85	15	39/49/59	0,37/не задано

На рис. 8 представлено седло клапана, смоделированное в APM Structure 3D. В качестве конечных элементов выбраны пластины. Оболочка разбита на четырехугольные конечные элементы, а пластина на треугольные с шагом в 2 мм, что позволило получить при триангуляции регулярную сетку [17].

Процесс построения и разбиения на конечные элементы упругих ограничителей подо-

бен тому, как это выполнялось для тонкостенного седла клапана [14, 15]. Конечно-элементная модель упругих ограничителей показан на рис. 9.

Приложение нагрузки в модуле APM Structure 3D приводится к узлам либо распределяется по пластинчатым элементам конечно-элементной сетки.

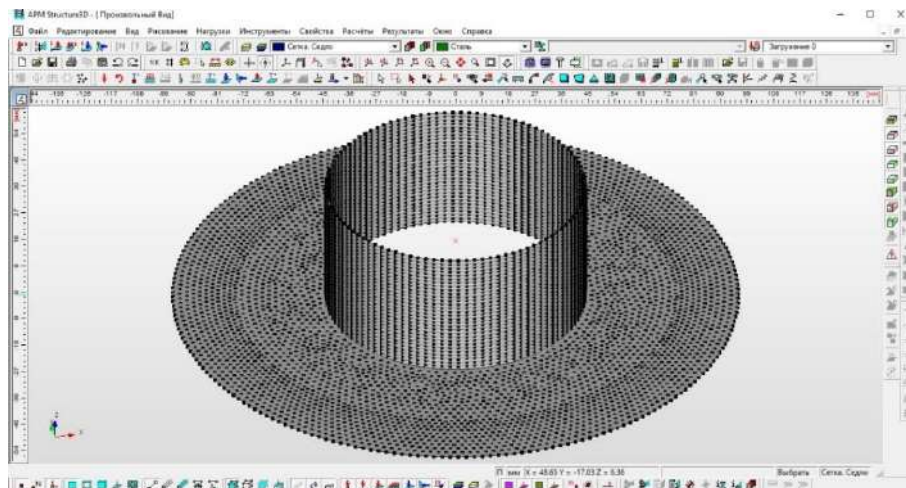


Рис. 8. Конечно-элементная модель уплотнения
Fig. 8. Finite element model of compaction

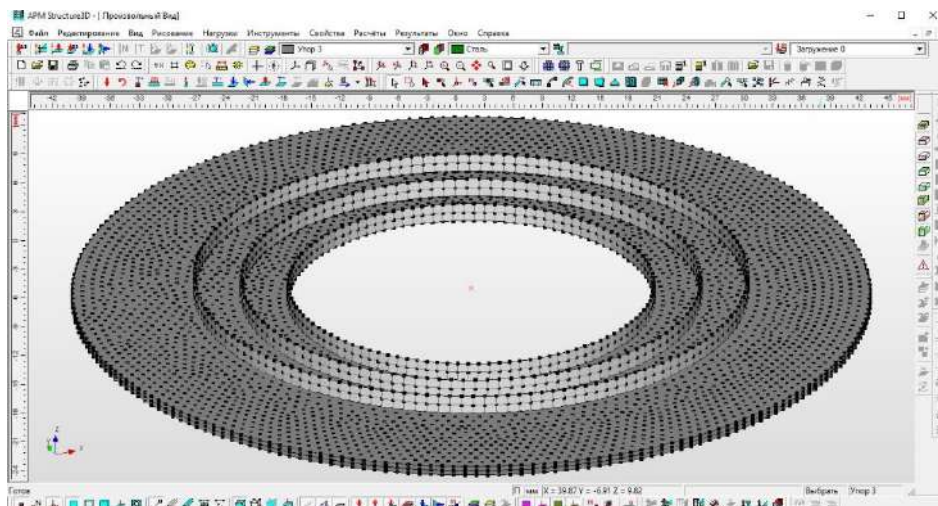


Рис. 9. Конечно-элементная модель упругих ограничителей
Fig. 9. Finite element model of elastic limiters

Для того чтобы смоделировать усилие в зоне контакта «золотник – седло» и учесть трение, необходимо создать дополнительный узел и группу стержней, что позволит приложить нагрузку по периметру уплотнения под необходимым углом – полную реакцию R (рис. 10). Также необходимо ограничить перемещения нагружаемого дополнительного узла [18] в плоскости перпендикулярной вектору силы F , который будет передавать нагрузку на оболочку.

На рис. 11 показана модель с приложенным усилием со стороны привода. По периметру пластины тонкостенного уплотнения и упругих ограничителей выполнено закрепление в виде жесткой заделки.

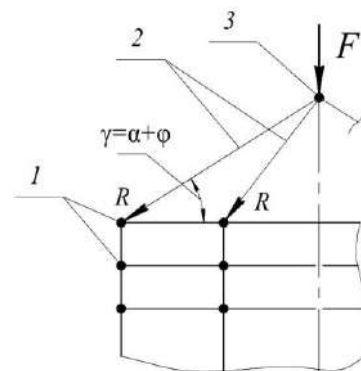


Рис. 10. Схема нагружения седла в APM Structure 3D:
1 – узлы сетки; 2 – дополнительные стержни;
3 – нагружаемый узел; R – полная реакция;
 φ – угол трения

Fig. 10. Saddle loading scheme in AWP Structure 3D:
1 – grid nodes; 2 – additional rods; 3 – loaded node;
 R – total reaction; φ – friction angle

Отсутствие контакта между тонкостенным уплотнением и упругими ограничителями для представленной на рис. 11 модели ведет к тому, что при запуске на расчет в APM Structure 3D происходит деформация только седла. Имеющиеся в APM Structure 3D возможности по созданию упругих связей между узлами и совместных перемещений в узлах использовать неправильно. Инструмент «создание упругой связи» задается через жесткость и используется в основном для создания пружин, а «совместные перемещения» обеспечивают передачу всех нагрузок от одного узла к другому без изменения, что для рассматриваемой модели не подходит.

Разобьем процесс моделирования нагружения седла затвора на несколько этапов:

1. Предварительное нагружение седла для определения его осевых перемещений, а, соответственно, и расстояния до первого упругого ограничителя (момент касания седла упругого ограничителя).

2. Нагружение седла после контакта с упругим упором (этап повторяется для второго и третьего упоров) силой $\Delta F = F_1 - F_2$, опреде-

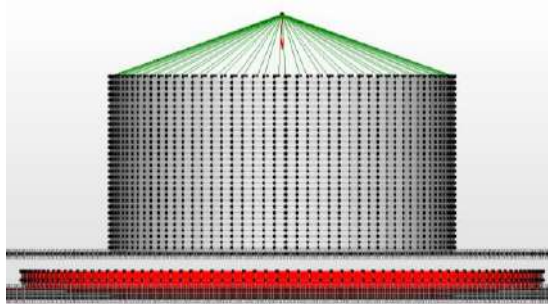
ляемой как разность между первоначальным значением F_1 – момент контакта седла с первым упором и F_2 – момент контакта седла со вторым упором.

3. Сопоставление и анализ результатов моделирования седла затвора клапана при использовании упругих упоров и при их отсутствии.

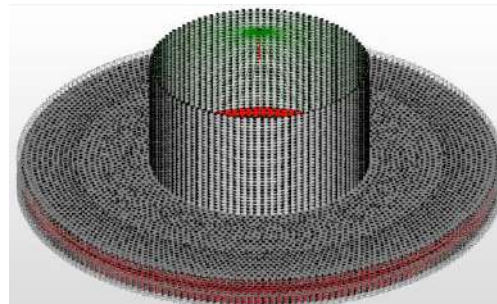
Для моделирования контакта тонкостенного уплотнения и упругих упоров на первоначальном этапе необходимо определить значение силы F , при котором осевые перемещение седла будут происходить до первого упругого упора – момента касания. В рассматриваемом примере значение $F = 460$ Н.

Максимальные суммарные перемещения седла клапана при нагрузках 460 Н и 690 Н представлены на рис. 12.

Учитывая, что значения суммарных перемещений при нагрузке 460 Н происходит на 0,3711 мм, расположим первый упругий ограничитель на указанном расстоянии от седла, что обеспечит работу седла в зоне упругих деформаций при превышении нагрузки над расчетным значением.

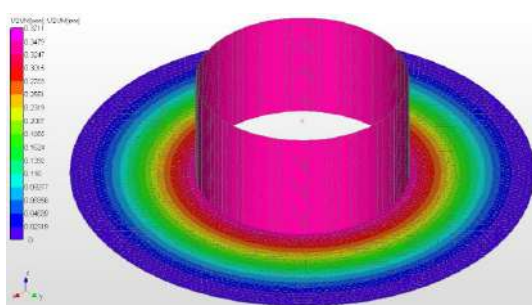


а

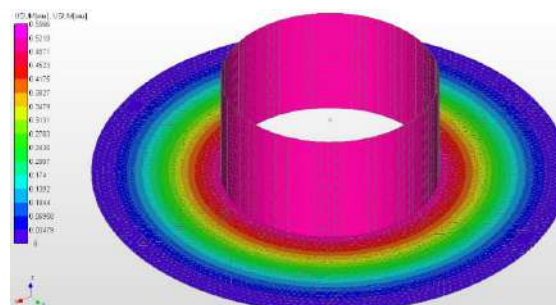


б

Рис. 11. Расчетная модель клапана: а – вид сбоку; б – трехмерная модель
Fig. 11. Calculation model of the valve: a – side view; b – three-dimensional model



а



б

Рис. 12. Карта суммарных перемещений USUM седла клапана без учета давления рабочей среды:
а – при нагрузке 460 Н; б – при нагрузке 690 Н

Fig. 12. Map of total displacements USUM of the valve seat without taking into account the pressure of the working medium:

а – at a load of 460 N; б – at a load of 690 N

Напряжения, возникающие в уплотнении при нагрузке 460 Н – момент касания седла с первым упругим ограничителем и при 690 Н, когда седло перегружено – показаны на рис. 13.

На следующем этапе моделирования при возрастании нагрузки (более 460 Н) жесткость седла увеличивается за счет первого упругого ограничителя. Согласно полученным результатам из «карты перемещений USUM», например, при возрастании нагрузки до $F = 690$ Н осевые перемещения оболочки составят 0,39 мм, напряжения возрастут до 225 МПа (рис. 14), а перемещения упругого ограничителя (рис. 15) составят 0,01835 мм.

Отметим, что при отсутствии упругого ограничителя значения напряжений и перемещений в седле соответствовали бы указанным на рис. 12 и 13.

Если давление на седло затвора клапана продолжит возрастать, жесткость уплотнения

будет увеличиваться по мере достижения следующих упругих ограничителей. Таким образом, упругие ограничители обеспечат работу тонкостенного седла в области упругих деформаций.

Моделирование нагружения со вторым и третьим упругими ограничителями аналогично описанному.

Заключение

Полученные значения перемещений и напряжений свидетельствуют о том, что седло можно выполнить более тонкостенным – обеспечить минимизацию приведенной жесткости, тем самым минимизировав усилие герметизации по периметру оболочки при условии обеспечения прочности уплотнения.

При уменьшении толщины пластины и оболочки необходимо учитывать, что упругий упор должен располагаться на более близком

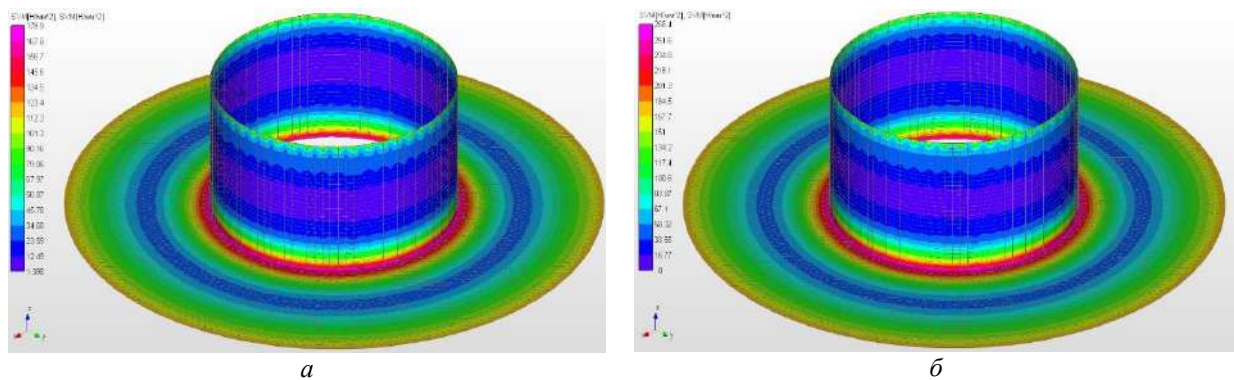


Рис. 13. Карта суммарных напряжений SVM седла клапана без учета давления рабочей среды: *a* – при нагрузке 460 Н; *б* – при нагрузке 690 Н

Fig. 13. SVM total stress map of the valve seat without taking into account the pressure of the working medium: *a* – at a load of 460 N; *b* – at a load of 690 N

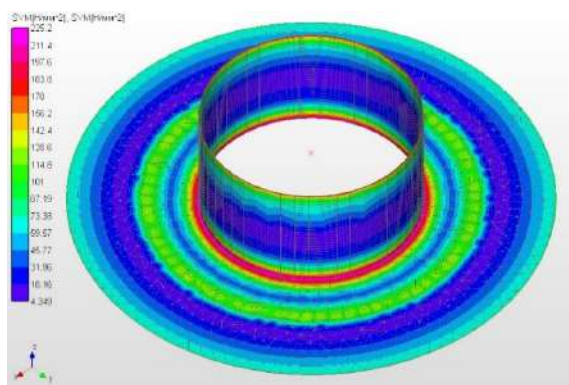


Рис. 14. Карта суммарных напряжений SVM седла
Fig. 14. SVM Saddle Total Stress Map

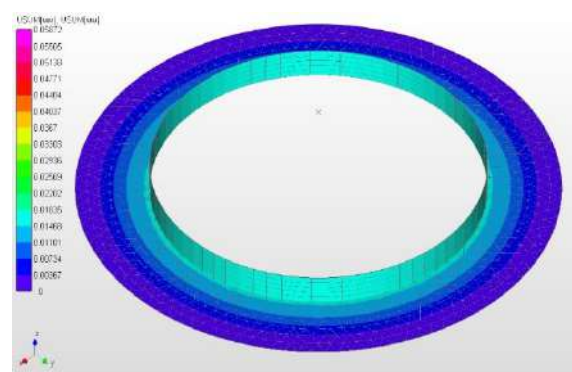


Рис. 15. Карта суммарных перемещений USUM
упругого ограничителя
Fig. 15. Map of total displacements USUM
of elastic limiter

расстоянии к седлу, так как значение напряжения 180 МПа при нагрузке $F = 460$ Н будет достигнуто раньше.

Для повышения достоверности работы тонкостенного уплотнения необходимо прове-

сти его моделирование с учетом давления рабочей среды, особенно в условиях его нестационарности [19–22].

Список литературы

1. ГОСТ 24856-2014. Арматура трубопроводная. Термины и определения. Введ. 2015–04–01. М. : Стандартинформ, 2020. 90 с.
2. Долотов А.М., Огар П.М., Чегодаев Д.Е. Основы теории и проектирования уплотнений пневмогидроарматуры летательных аппаратов. М. : Изд-во МАИ, 2000. 296 с.
3. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин. М. : Машиностроение, 1973. 456 с.
4. 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.
5. 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.
6. Долотов А.М., Ереско С.П., Огар П.М. Основы теории проектирования уплотнений гидропневмо-вакуумных систем. Красноярск : СибГАУ, 2013. 307 с.
7. 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 : ИрГУПС, 2012. С. 124–128.
8. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Обзор способов разгрузки золотника клапана от давления герметизируемой среды // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 3 (7). С. 30–36.
9. А. с. 1620756 СССР. Уплотнительный узел клапана / А.М. Долотов, П.М. Огар, В.М. Квасов и др. № 4632000/29 ; заявл. 04.01.89 ; опубл. 15.01.91, Бюл. № 2. 3 с.
10. А. с. 1634913 СССР. Запорная пара клапана / А.М. Долотов, П.М. Огар, В.М. Квасов и др. № 4629012/29; заявл. 30.12.88 ; опубл. 15.03.91, Бюл. № 10. 3 с.
11. Пат. 2506482 Рос. Федерация. Клапан / А.М. Долотов, Ю.И. Белоголов. № 2012132174/06 ; заявл. 26.07.2012 ; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4. 6 с.
12. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. М. : Машиностроение, 1974. 486 с.
13. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. М. : Машиностроение, 1993. 640 с.
14. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде APM Structure 3D. М. : АПМ, 2006. 287 с.
15. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде APM Structure 3D. М. : АПМ, 2010. 375 с.
16. APM Structure 3D. Руководство пользователя. М. : АПМ, 2009. 190 с.
17. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 542 с.
18. Расчет машиностроительных конструкций методом конечных элементов / В.И. Мяченков, В.П. Мальцев, В.П. Майборода и др. М. : Машиностроение, 1989. 520 с.
19. Огар П.М. Контактные характеристики и герметичность неподвижных стыков пневмогидроопливных систем двигателей летательных аппаратов : дис. ... д-ра техн. наук. Братск, 1997. 345 с.
20. Огар П.М., Герасимов С.В., Глинов С.Н. Герметичность соединений с элементами пониженной жесткости // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ : межвуз. темат. сб. тр. Вып. 11. СПб., 2005. С. 271–275.
21. Огар П.М., Шеремета Р.Н., Лханаг Д. Герметичность металлополимерных стыков шероховатых поверхностей. Братск : БрГУ, 2006. 159 с.
22. Огар П.М., Горохов Д.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей: фрактальный подход. Братск : БрГУ, 2007. 171 с.

References

1. GOST 24856-2014. Armatura truboprovodnaya. Terminy i opredeleniya [State Standard 24856-2014. Pipeline valves. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform Publ., 2020. 90 p.
2. Dolotov A.M., Ogar P.M., Chegodaev D.E. Osnovy teorii i proyektirovaniya uplotneniy pnevmogidroarmatury letatel'nykh apparatov [Fundamentals of the theory and design of seals for aircraft pneumohydraulic fittings]. Moscow: MAI Publ., 2000. 296 p.
3. Boyarshinov S.V. Osnovy stroitel'noi mekhaniki mashin [Fundamentals of structural mechanics of machines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1973. 456 p.
4. 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.
5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Obzor sposobov razgruzki zolotnika klapana ot davleniya germetiziruemoi sredy [Review of methods for unloading the valve spool from the pressure of the sealed medium]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technology], 2010, no. 3 (7), pp. 30–36.

9. Dolotov A.M., Ogar P.M., Kvasov V.M., Kondrashov Yu.I. Copyright certificate SU 1620756 A1, 15.01.1991.

10. Dolotov A.M., Ogar P.M., Kvasov V.M., Kondrashov Yu.I. Copyright certificate SU 1634913 A1, 15.03.1991.

11. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Patent RU 2506482 C1, 10.02.2014.

12. Biderman V.L. Mekhanika tonkostennykh konstruksii [Mechanics of thin-walled structures]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1974. 486 p.

13. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. Raschet na prochnost' detalei mashin [Calculation for the strength of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1993. 640 p.

14. Zamrii A.A. Proektirovanie i raschet metodom konechnykh elementov trekhmernykh konstruksii 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., 2006. 287 p.

15. Zamrii A.A. Proektirovanie i raschet metodom konechnykh elementov trekhmernykh konstruksii 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.

16. APM Structure 3D. Rukovodstvo pol'zovatelya [APM Structure 3D. User's guide]. Moscow: APM Publ., 2009. 190 p.

17. Zienkiewicz O.C. Metod konechnykh elementov v tekhnike [The Finite Element Method in Engineering Science]. Moscow: Mir Publ., 1975. 542 p.

18. Myachenkov V.I., Mal'tsev V.P., Maiboroda V.P., Petrov V.B., Frolov A.N., Zayakin S.P., Ol'shanskaya G.N., Gorlov V.B., Bondar' V.S., Gorshkov S.P., Korol'kov S.S., Zhukov Yu.V., Tselikh A.V. Raschet mashinostroitel'nykh konstruksii metodom konechnykh elementov [Calculation of machine-building structures by the finite element method]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1989. 520 p.

19. Ogar P.M. Kontaktnye kharakteristiki i germetichnost' nepodviznykh stykov pnevmogidrotoplivnykh sistem dvigatelei leta-tel'nykh apparatov [Contact characteristics and tightness of fixed joints of pneumohydrofuel systems of aircraft engines]. Doctor's theses. Bratsk, 1997. 345 p.

20. Ogar P.M., Gerasimov S.V., Glinov S.N. Germetichnost' soedinenii s elementami ponizhennoi zhestkosti [Tightness of joints with elements of reduced rigidity]. *Mezhvuzovskii tematicheskii sbornik trudov «Matematicheskoe modelirovanie, chislennye metody i komplekсы программ»* [Interuniversity Thematic Proceedings «Mathematical modeling, numerical methods and software packages»]. Saint Petersburg, 2005, pp. 271–275.

21. Ogar P.M., Sheremeta R.N., Lkhanag D. Germetichnost' metallopolimernykh stykov sherokhovatykh poverkhnostei [Tightness of metal polymer joints of rough surfaces]. Bratsk: BrGU Publ., 2006. 159 p.

22. Ogar P.M., Gorokhov D.B. Kontaktirovanie sherokhovatykh poverkhnostei: fraktal'nyi podkhod [Contacting rough surfaces: a fractal approach]. Bratsk: BrGU Publ., 2007. 171 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

№ 3 (83)
2 0 2 4

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **Ю.А. Трофимов**
Ответственный за выпуск **Д.В. Буторин**

Подписано в печать 10.12.2024.

Дата выхода в свет 12.12.2024

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 18,95.

Уч.-изд. л. 12,63. Тираж 500 экз. Заказ № 3748

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, издателя 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)