

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

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



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

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

2022 № 4(76)

Современные технологии.
Системный анализ. Моделирование

ISSN 1813-9108 (Print)

Современные технологии Системный анализ Моделирование

2022
№ 4 (76)

Иркутский государственный
университет путей сообщения

Машиностроение • Машиноведение • Энергетические системы • Транспорт

Д.Т.Н., профессор
Александр Валерьевич



ЛИВШИЦ

«Высокочастотная
электротермия
полимеров
и композитов»

Machine Building • Theoretical Engineering • Energy Systems • Transport

Modern technologies System analysis Modeling

2022
No. 4 (76)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№ 4 (76)

2 0 2 2

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **А.П. Хоменко**
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

А.П. Хоменко, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

Заместители главного редактора

Д.В. Буторин, к.т.н., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

Редакционный совет

А.И. Артюнин, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

И.В. Бычков, академик РАН, Иркутский государственный университет (Иркутск, Российская Федерация)

И.И. Галиев, д.т.н., проф., Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Российская Федерация)

А.В. Данеев, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

А.В. Крюков, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

М.И. Кузьмин, академик, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (Иркутск, Российская Федерация)

Н.А. Махутов, д.т.н., проф., член-корреспондент РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Российская Федерация)

В.В. Москвичев, д.т.н., проф., Институт вычислительных технологий СО РАН (Красноярск, Российская Федерация)

А.В. Мурыгин, д.т.н., проф., Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва (Красноярск, Российская Федерация)

С.И. Носков, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

С.М. Овчаренко, д.т.н., доц., Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Российская Федерация)

П.М. Огар, д.т.н., проф., Братский государственный университет (Братск, Российская Федерация)

Та Зуи Фьонг, к.ф.-м.н., доц., Ханойский институт математики (Вьетнам)

Р. Энхбат, д.ф.-м.н., проф., Монгольский национальный университет (Монголия)

Здислав Якиевич, д.т.н., проф., Университет штата Аризона (США)

А.С. Янюшкин, д.т.н., проф., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (Чебоксары, Российская Федерация)

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

Телефон: +7(3952) 63-83-57

Сайт: <https://ojs.irgups.ru/index.php/stsam>

e-mail: stsam@irgups.ru

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 образования и науки РФ по специальностям: машиностроение и машиноведение; транспорт.

Modern technologies System analysis Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)

2022
No. 4 (76)

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.
- 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
(Office G-302, 15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russian Federation)

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

D.V. Butorin, Ph.D. in Engineering Science, Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

Editorial council

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

I.V. Bychkov, Member of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk State University (Irkutsk, Russian Federation)

I.I. Galiev, D.Sc. in Engineering, Prof., Omsk State Transport University (Omsk, Russian Federation)

A.V. Daneev, 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)

M.I. Kuzmin, Academician, Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russian Federation)

N.A. Makhutov, D.Sc. in Engineering, Prof., Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

V.V. Moskvichyov, D.Sc. in Engineering, Prof., Institute of Computational Technologies, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russian Federation)

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

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

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

P.M. Ogar, D.Sc. in Engineering, Prof., Bratsk State University (Bratsk, Russian Federation)

Ta Zui Fuong, Ph.D. in Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Hanoi Institute of Mathematics (Vietnam)

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

Tel.: +7(3952) 63-83-57

Web-Site: <https://ojs.irgups.ru/index.php/stsam>

e-mail: stsam@irgups.ru

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 Education and Science of the Russian Federation, should be published:

- Mechanical engineering and mechanical science;
- Transport.

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение, машиноведение и энергетические системы

Лукиянов А.В., Куприянов И.С., Лукьянов Д.А. Исследование радиальных сил асинхронных электродвигателей при несимметрии тока в фазах	10
Реутов А.А. Анализ крутильных колебаний деталей автомобильной трансмиссии с гидротрансформатором	23
Великанов В.С., Гришин И.А., Дёрина Н.В., Лукашук А.Д. Система управления и безопасности крутонаклонных подъемников для транспортирования горной массы при разработке месторождений	35

Транспорт

Лакин И.И., Семченко В.В., Раздобаров А.В. Анализ эффективности сервисной формы технического обслуживания и ремонта локомотивов	46
Подвербный В.А., Титов К.М., Холодов П.Н., Гнездилова О.А. Автоматизация расчета толщины подбалластного защитного слоя	57
Тюньков В.В., Мартыненко Л.В., Павлова Д.И., Саранзая Атарцэцг. Линеаризация взаимодействия внутренней и внешней кинематики длиннобазных грузовых вагонов для прохода кривых малого радиуса	72
Акашев М.Г., Савоськин А.Н., Чунин В.В. Создание модели тензометрической колесной пары с применением программного комплекса «Универсальный механизм»	81
Зелова М.И., Комаров А.В. О применении комплекса автоматизированного управления движением поездов в условиях высокой интенсивности движения	92
Юрьев А.В., Гаранин А.Е., Юрьева Д.А., Ремяников К.П., Миллер Д.П., Малькова А.И., Сергиенко А.В. Результаты экспериментальных исследований электрогидроимпульсного дробления железобетонных отходов из демонтированных опор контактной сети	101
Ковенькин Д.А., Валиев Н.А. Применение солнцезащитного навеса для стабилизации оползневых процессов на 1686–1688 км ПЧ-27 Восточно-Сибирской железной дороги	109
Кашковский В.В., Тихий И.И., Глинский И.Ю. Перспективы применения спектрального акустического метода неразрушающего контроля	123
Родченко А.Д., Томилова О.С., Сергеев П.Б., Михеев В.А. Совершенствование системы контроля целостности электрической цепи электропневматических тормозов в пассажирском поезде железнодорожного транспорта	136
Барсуков С.В., Пахомов С.В. Прогноз-модель оценки ресурса объекта диагноза с учетом изменения стоимости пропуска дефекта	144
Ахмедзянов Г.Г., Галеев А.Д., Ключников М.В., Литвинов А.В. Анализ обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах в Российской Федерации	153
Осипов Д.В., Иванов П.Ю., Ковшин А.С., Пахомов В.В. Применение методов конечных элементов при изготовлении изделий с помощью аддитивных технологий	162

Оленевич В.А., Власова Н.В. Увеличение пропускной и провозной способностей инфраструктуры Восточного полигона за счет применения инновационного подвижного состава при транспортировке угольных грузов маршрутами	173
Доманов К.И., Давыдов В.А. Перспективы внедрения электровоза 2ЭС5К в эксплуатацию на полигоне Западно-Сибирской железной дороги	183
Пультяков А.В., Алексеенко В.А. Управление инцидентами при оперативном контроле состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики центрами технической диагностики и мониторинга	192
Ефимов Н.А., Тычков А.С. Эластичные полиуретановые амортизаторы	206
Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л., Астраханцев Л.А., Асташков Н.П., Байкова Л.А., Немыкина В.В. Перспективные энергетические технологии электрической тяги поездов	215

Информационные технологии, управление и обработка

Дусакаева С.Т., Хохлов И.А., Нирян П.Л., Носарев М.П. Применение алгоритма нечеткой логики Мамдани для отбора игроков в футбольный клуб на предсезонных сборах	228
Лившиц А.В., Буторин Д.В., Филиппенко Н.Г., Горобец А.Н., Александров А.А. Общие подходы к управлению социальной системой «сотрудник подразделения транспортной безопасности – физ. лицо (или группа физ. лиц)», участвующие в процессе обеспечения транспортной безопасности	238

Персоналии

Д.т.н., профессор Лившиц А.В.	250
------------------------------------	-----

CONTENTS

Machine Building, Theoretical Engineering and Energy Systems

Lukyanov A.V., Kupriyanov I.S., Lukyanov D.A. Research of radial forces in asynchronous electric motors with nonsymmetrical current phases 10

Reutov A.A. Analysis of torsional vibration of the automobile transmission parts with torque converter 23

Velikanov V.S., Grishin I.A., Derina N.V., Lukashuk A.D. Control and safety system of high-inclined elevators for rock mass transportation during field mining 35

Transport

Lakin I.I., Semchenko V.V., Razdobarov A.V. The service form effectiveness analysis of locomotives maintenance and repair 46

Podverbnyi V.A., Titov K.M., Kholodov P.N., Gnezdilova O.A. Automation of the sub-ballast protective layer thickness calculation 57

Tyun'kov V.V., Martynenko L.V., Pavlova D.I., Saranzayaa Atartsetseg Automation of the sub-ballast protective layer thickness calculation 72

Akashev M.G., Savos'kin A.N., Chunin V.V. Creating a strain-gauge wheel set model using software package «Universal mechanism» 81

Zelova M.I., Komarov A.V. On the application of an automated train traffic control complex under high traffic intensity 92

Yur'ev A.V., Garanin A.E., Yur'eva D.A., Remyannikov K.P., Miller D.P., Mal'kova A.I., Sergienko A.V. Results of experimental investigation of the electrohydroimpulse method for crushing reinforced concrete scrap waste from dismantled contact network supports of railway overhead line 101

Koven'kin D.A., Valiev N.A. Application of a sun- and precipitation protective shed to stabilize landslide processes on 1686–1688 km WP-27 of the East Siberian Railway 109

Kashkovskii V.V., Tikhii I.I., Glinskii I.Yu. Prospects for the application of the spectral acoustic method of non-destructive testing 123

Rodchenko A.D., Tomilova O.S., Sergeev P.B., Mikheev V.A. Improving the control system of the electrical circuit integrity of electropneumatic brakes in a railway passenger train 136

Barsukov S.V., Pakhomov S.V. Improving the control system of the electrical circuit integrity of electropneumatic brakes in a railway passenger train 144

Akhmedzyanov G.G., Galeev A.D., Klyuchnikov M.V., Litvinov A.V. Analysis of traffic safety at level crossings in the Russian Federation 153

Osipov D.V., Ivanov P.Yu., Kovshin A.S., Pakhomov V.V. Application of finite element methods in the manufacture of products using additive technologies 162

Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Increasing the throughput and carrying capacity of the Eastern Poligon infrastructure by using innovative rolling stock in the transportation of coal cargo by routes	173
Domanov K.I., Davydov V.A. Prospects for commissioning of the 2ES5K electric locomotive at the West Siberian Railway Poligon	183
Pulyakov A.V., Alekseenko V.A. Incident management during operational monitoring of the state of railway automation and telemechanics devices by technical diagnostics and monitoring centers	192
Efimov N.A., Tychkov A.S. Elastic polyurethane shock absorbers	206
Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A., Astashkov N.P., Baikova L.A., Nemykina V.V. Promising energy technologies for electric traction of trains	215

Information technology, management and processing

Dusakaeva S.T., Khokhlov I.A., Nirian P.L., Nosarev M.P. Application of the Mamdani Fuzzy Logic Algorithm for the Selection of Players for a Football Club at the Preseason Training Camp	228
Livshits A.V., Butorin D.V., Filippenko N.G., Gorobets A.N., Alexandrov A.A. General approaches to the management of the social system «Employee of the transport Safety Unit – individual (group of individuals)» participating in the process of ensuring transport security	238

Personalities

Doctor of Engineering Science, Full Professor A.V. Livshits	250
---	-----

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 7.0.100-2018. «Библиографическая запись. Библиографическое описание».

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: <https://ojs.irgups.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) 63-83-57. E-mail: stsam@irgups.ru

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МАШИНОВЕДЕНИЕ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

**MACHINE BUILDING, THEORETICAL ENGINEERING
AND ENERGY SYSTEMS**

Исследование радиальных сил асинхронных электродвигателей при несимметрии тока в фазах

А.В. Лукьянов¹✉, И.С. Куприянов¹, Д.А. Лукьянов²

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

²Технологическая служба Управления Восточно-Сибирской железной дороги, г. Иркутск, Российская Федерация

✉loukian@inbox.ru

Резюме

В статье рассмотрены результаты исследования поведения радиальных сил в воздушном зазоре асинхронного электродвигателя в нормальном режиме работы и при возникновении несимметрии фаз питающего тока и ее дальнейшем развитии вплоть до обрыва фазы. При эксплуатации в условиях производства подводимая к асинхронному электроприводу трехфазная электрическая сеть не всегда бывает симметрична. Причиной этого могут быть как особенности электрической цепи (подключение однофазных потребителей энергии), так и неисправности монтажа или преобразующего оборудования, а часто и все факторы в комплексе. Для того чтобы прогнозировать поведение как самого асинхронного электродвигателя, так и смежных с ним систем, предотвратить аварийный выход асинхронного электродвигателя из строя, необходимо провести полное и достоверное исследование процессов, происходящих в приводе при несимметрии тока в фазах. В работе построена уточненная математическая модель формирования радиальных сил в воздушном зазоре электродвигателя, по которой произведены расчеты и дана оценка изменения амплитуды и распределения радиальных сил при различных уровнях несимметрии питающего тока в фазах статора. По результатам расчетов построены трехмерные графики распределения радиальных сил в воздушном зазоре и определен характер радиальных колебаний. Проведено конечно-элементное моделирование воздействия радиальных сил на статор. По его результатам определены характер и величина деформации статора при действии радиальных сил. Представленные в рамках статьи результаты исследований позволяют судить о колебательных и тепловых процессах, протекающих в машине под действием радиальных сил при наличии несимметрии фаз питающего тока. В лабораторных условиях произведены измерения вибрации и тепловой картины при работе электродвигателя при наличии несимметрии питающего тока в фазах статора, которые подтверждают данные, полученные в результате теоретических исследований.

Ключевые слова

несимметрия тока, асинхронный двигатель, радиальные силы, воздушный зазор электродвигателя, конечно-элементное моделирование, вибрация, обрыв фазы

Для цитирования

Лукьянов А.В. Исследование радиальных сил асинхронных электродвигателей при несимметрии тока в фазах / А.В. Лукьянов, И.С. Куприянов, Д.А. Лукьянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 10–22. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).10-22.

Информация о статье

поступила в редакцию: 7.12.2022 г.; поступила после рецензирования: 26.12.2022 г.; принята к публикации: 27.12.2022 г.

Research of radial forces in asynchronous electric motors with nonsymmetrical current phases

A.V. Lukyanov¹✉, I.S. Kupriyanov¹, D.A. Lukyanov²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Technological Service of the Management of the East Siberian Railway, Irkutsk, the Russian Federation

✉loukian@inbox.ru

Abstract

The article considers the results of a study of the behavior of radial forces in an asynchronous electric motor air gap in normal operation mode and in the event of asymmetry of the supply current and its development up to phase failure. When operating under a production conditions, a three-phase electrical network supplied to an asynchronous electric drive may not always be symmetrical. The reason can be both the characteristics of the electrical circuit (connection of single-phase energy consumers) and malfunctions of installation or converting equipment, and often a combination of all factors. In order to predict the behavior of both the asynchronous electric motor itself and dependent and adjacent systems and prevent the asynchronous electric motor failure, it is necessary to conduct a complete and reliable study of the processes occurring in the drive under current asymmetry in phases. A mathematical model of the behavior of radial forces in the air gap of the electric motor was constructed, according to which calculations were made allowing to evaluate the change in the amplitude and distribution of radial forces at various levels of supply current asymmetry in the stator phases. Based on the results of calculations, three-dimensional graphs of the distribution of radial forces in the air gap were constructed, and the nature of their oscilla-

tions was determined. A finite-element simulation of the effect of radial forces on the stator has been carried out. The results determined the nature and magnitude of the stator deformation under the influence of radial forces. The results of the research presented within the framework of the article make it possible to assess the oscillatory and thermal processes occurring in the machine under the radial forces in the presence of asymmetry of the supply current phases. Under laboratory conditions, vibration and thermal picture measurements were made during the operation of the electric motor in the presence of asymmetry of the supply current in the stator phases, which confirm the data obtained from the results of theoretical studies.

Keywords

current unbalance, asynchronous motor, radial forces, electric motor air gap, finite element modeling, oscillations, phase failure

For citation

Lukyanov A.V., Kupriyanov I.S., Lukyanov D.A. Issledovanie radial'nykh sil asinkhronnykh elektrodvigatelei pri nesimmetrii toka v fazakh [Research of radial forces of asynchronous electric motors with nonsymmetrical current phases]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 10–22. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).10-22.

Article Info

Received: December 7, 2022; Revised: December 26, 2022; Accepted: December 27, 2022.

Введение

В работе проведены экспериментальные исследования тангенциальной и радиальной вибрации, генерируемой тангенциальными и радиальными силами [1–3]. Это повышает актуальность исследований возмущающих сил и вида их пространственно-временных зависимостей.

В отличие от лабораторных условий, в процессе эксплуатации асинхронного электропривода на каждую из его фаз может приходиться несимметричная нагрузка. Причинами возникновения этого являются: подключение мощных однофазных потребителей, дефекты фазорасщепителя в электровозах или монтажа асинхронного электропривода [3]. В итоге возникает неисправность – несимметрия фазного тока, и как ее крайнее проявление – обрыв фазы [2]. В связи с этим повышается актуальность исследования влияния изменения радиальных сил на силовые, динамические и тепловые характеристики асинхронных электродвигателей (АЭД) вспомогательных машин электровозов [4], что и является целью данной работы. В статье представлены результаты конечно-элементного моделирования механических колебаний электродвигателей и получена зависимость изменения уровня вибрации от воздействия радиальных сил при увеличении несимметрии тока в обмотках фаз. При моделировании механических колебаний при работе в несимметричных режимах предполагалось, что конструкция АЭД полностью симметрична (электрические и магнитные параметры обмоток фаз статора полностью идентичны). Приведены также результаты лабораторных измерений радиальных вибраций и тепловизионной регистра-

ции при работе электродвигателя с данным дефектом.

Анализ радиальных электромагнитных сил в воздушном зазоре электродвигателя

Согласно [1] величина и распределение радиальных p_r и тангенциальных p_τ электромагнитных сил в воздушном кольцевом зазоре (рис. 1) определяются следующими выражениями:

$$p_r = \frac{1}{2\mu_0} b^2(\vartheta, t),$$

$$p_\tau = a(\vartheta, t) \cdot b(\vartheta, t)$$

где $a(\vartheta, t)$ – линейная токовая нагрузка ротора или статора; $b(\vartheta, t) = f(\vartheta, t) \cdot \Lambda(\vartheta, t)$ – магнитная индукция в зазоре между ротором и статором в точке в момент времени t с угловой координатой ϑ ; $f(\vartheta, t)$ и $\Lambda(\vartheta, t)$ – мгновенные значения результирующей магнитодвижущей силы (МДС) электрических обмоток статора, стержней ротора и магнитной проводимости зазора [1].

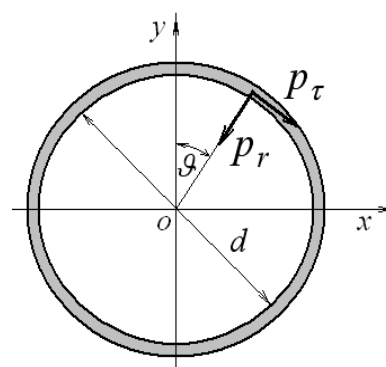


Рис. 1. Силы в кольцевом зазоре между ротором и статором

Fig. 1. Forces in the annular gap between the rotor and the stator

$$\begin{aligned}
 a(\vartheta, t) &= A_1 \cos(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{a_1}) + \\
 &+ A_2 \cos(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{a_2}), \\
 b(\vartheta, t) &= B_1 \cos(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{b_1}) + \\
 &+ B_2 \cos(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{b_2}),
 \end{aligned}$$

где A_1, A_2, B_1, B_2 – линейная токовая нагрузка статора и индукция результирующего магнитного поля в воздушном зазоре электродвигателя прямого и обратного следования фаз; $\varphi_{b_1}, \varphi_{b_2}$ – фазы индукции магнитного поля в воздушном зазоре прямого и обратного следования фаз; p – число пар полюсов статора прямой и обратной последовательности [1].

Распределенные радиальные силы в воздушном зазоре электродвигателя определяются выражением:

$$\begin{aligned}
 p_r = \frac{a_0}{2} \cdot \left[\begin{aligned} &(B_1^2 + B_2^2) + B_1^2 \cos^2(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{b_1}) + \\ &+ B_2^2 \cos^2(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{b_2}) \end{aligned} \right] + \\
 + a_0 \left[\begin{aligned} &B_1 B_2 \cos(2p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{b_1}) + \\ &+ B_1 B_2 \cos(2p\vartheta + \omega_1 t + \varphi_{b_2}) \end{aligned} \right],
 \end{aligned} \quad (1)$$

где $a = 1 / (2\mu_0) = 4 \cdot 10^5$ м/Гн.

Результирующие значения радиальных сил определяются как сумма их переменной и постоянной составляющих. Переменная составляющая меняет значение в пределах каждого полюса машины и представляет собой бегущую вокруг статора силовую волну. Постоянная составляющая в выражении (1) представляет собой систему распределенных сил, которые создают напряжения сжатия, изменяющие величину воздушного зазора машины [2, 4, 5].

Проинтегрировав радиальные силы по

координате ϑ на интервале $\vartheta \in [0; 2\pi]$ с учетом выражения (1), получим результирующую постоянную радиальных сил, действующих по всей длине окружности воздушного зазора:

$$P_r = R_{rot} l_{rot} \int_0^{2\pi} p_r d\vartheta,$$

где R_{rot} – радиус ротора, м; l_{rot} – длина активной части сердечника ротора, м.

Как видно результирующие выражения для расчета значения и распределения радиальных сил содержат как постоянную составляющую, так и изменяющуюся с периодом $2\omega_1 t$ (с удвоенной круговой частотой сети).

График на рис. 2 показывает результат расчета радиальных сил по уравнению (2) и их зависимость от величины несимметрии тока в фазах I_2/I_1 (где I_1 и I_2 – составляющие тока прямой и обратной последовательности) [6]:

$$\begin{aligned}
 P_{r\Sigma(0;2\pi)} = \int_0^{2\pi} p_r d\vartheta = a_0 \pi (B_1^2 + B_2^2) + \\
 + 2a_0 B_1 B_2 \pi \cos(2\omega_1 t + \varphi_{b_1} - \varphi_{b_2}).
 \end{aligned} \quad (2)$$

Анализ возникающих при несимметрии фазного тока деформаций поля радиальных сил и возмущений переменных составляющих

Для определения характера влияния распределенных в воздушном зазоре радиальных сил необходимо провести анализ данных, полученных из выражения (1) [7–9].

На рис. 3 и 4 представлены графики распределения радиальных сил p_r в воздушном зазоре асинхронного привода при изменении значений угловой координаты $\vartheta \in [0; 2\pi]$ в интервалах времени $t = T = 1/2\omega_1$. Данные интервалы

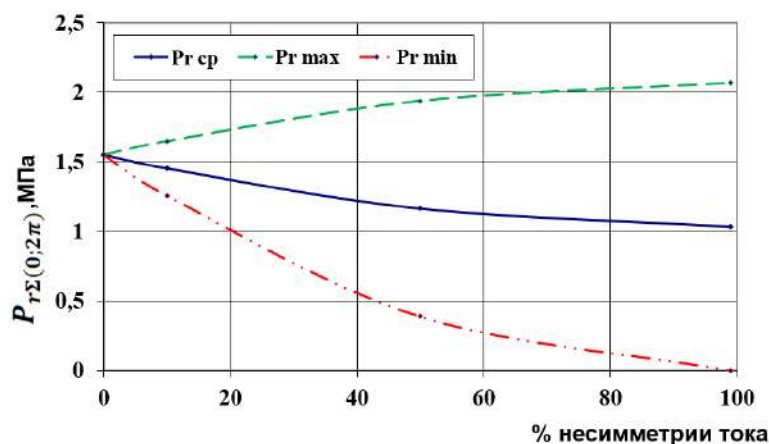


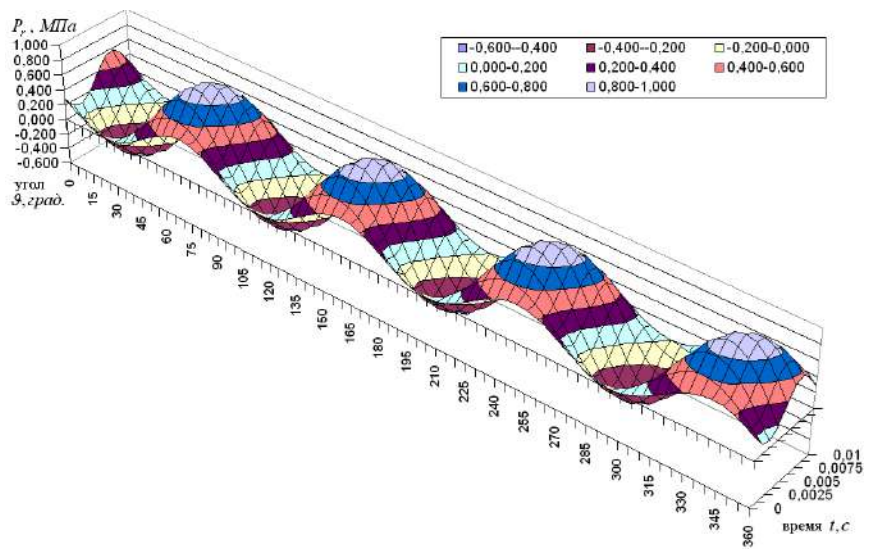
Рис. 2. Изменение радиальных сил в воздушном зазоре при увеличении несимметрии фазного тока
Fig. 2. Change of radial forces in the air gap with increasing phase current asymmetry

были выбраны по причине соответствия периоду изменения сил на межполюсном расстоянии [1, 3, 4, 6]. На рис. 3 представлены графики при нормальном режиме работы привода, т.е. когда токи в фазах статора полностью симметричны (несимметрия 0 %), на рис. 4 приведены графики при 100 %-ной предельной несимметрии (обрыв одной фазы обмотки статора).

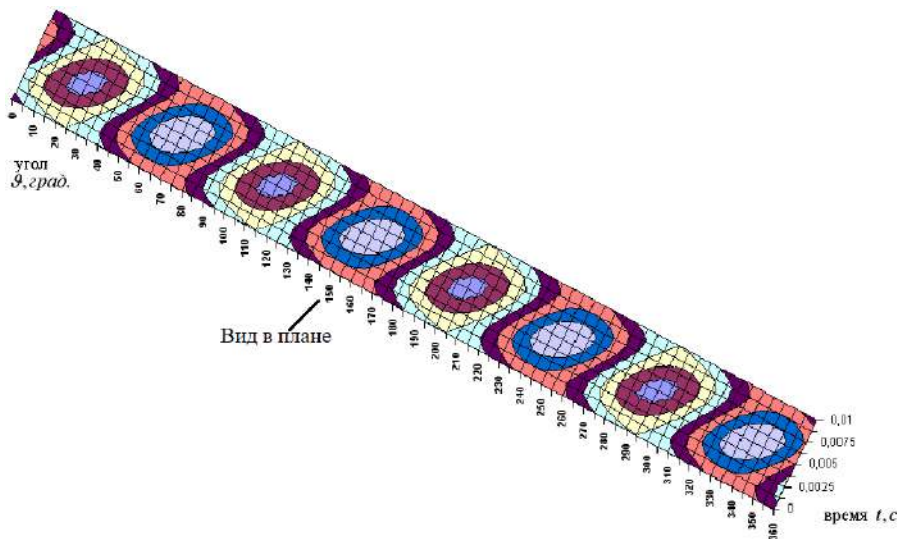
На приведенных графиках (рис. 3) можно наблюдать, что при нормальном режиме работы электродвигателя (т.е. при симметричной

личины радиальных сил p_r с ярко выраженными локальными максимумами и минимумами.

Количество этих максимумов и минимумов совпадает с числом полюсов [4, 5, 7] и они имеют незначительные отклонения по углу ϑ во времени. Максимальные значения радиальных сил наблюдаются при значениях угловых координат $\vartheta = 70^\circ, 160^\circ, 250^\circ, 340^\circ$, что соответствует расположению полюсов), минимальные значения расположены около углов $\vartheta = 25^\circ, 115^\circ, 205^\circ, 295^\circ$ (т.е. между полюсами электродвигателя).



a



б

Рис. 3. Зависимость амплитуды P_r от угла ϑ и времени при отсутствии несимметрии (0 %):
а – трехмерный график; б – вид сверху (0 %)

Fig. 3. Amplitude from angle and time in the absence of asymmetry (0 %):
а – three-dimensional graphic; б – top view

токовой нагрузке) наблюдаются колебания ве-

Также на рис. 3 можно наблюдать про-

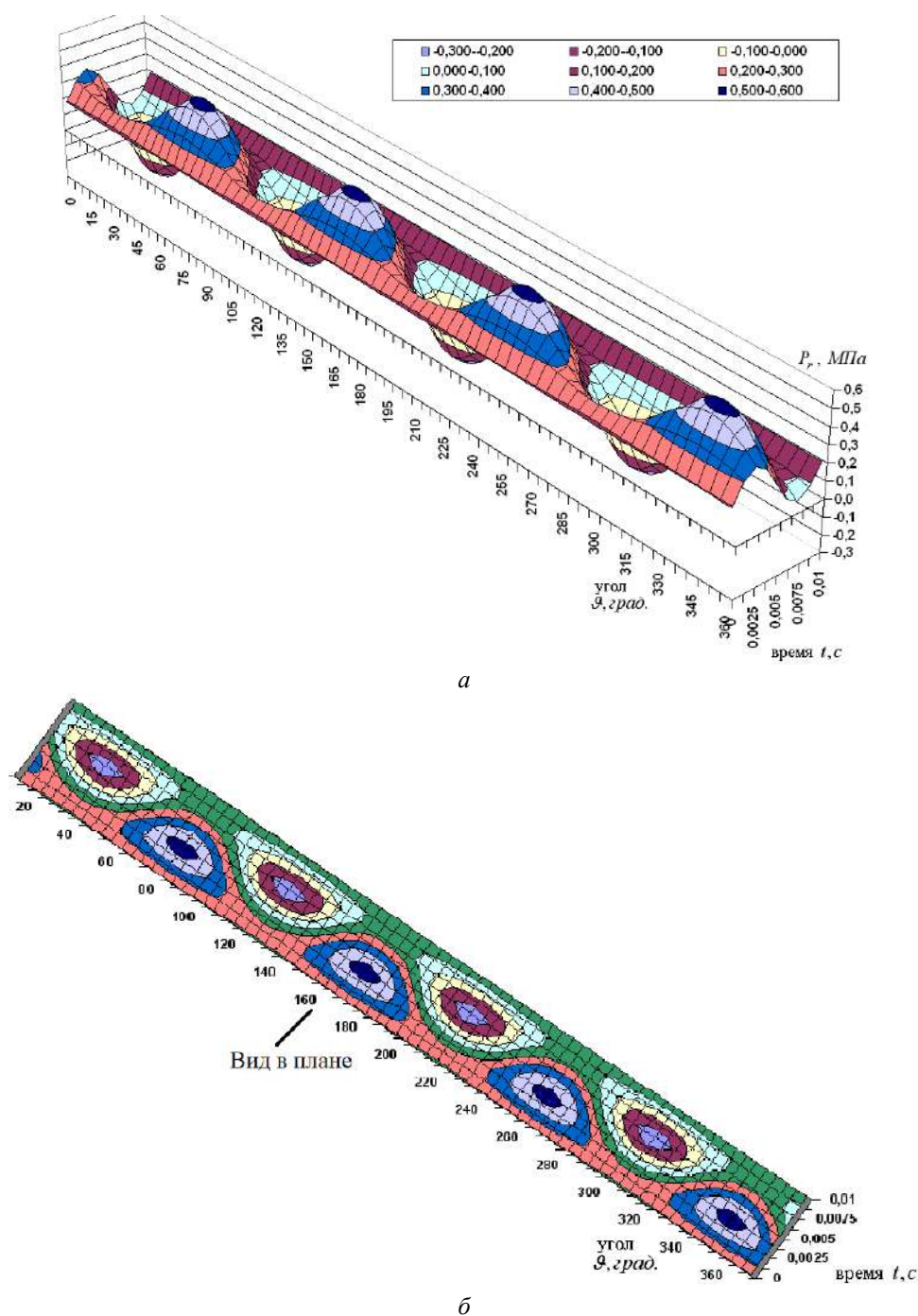


Рис. 4. Изменение амплитуды P_r от угла ϑ и времени при несимметрии 100 %:

a – трехмерный график; b – вид в плане

Fig. 4. Amplitude of the angle and time with a degree of asymmetry of 100 %:

a – three-dimensional graphic; b – top view

тивофазные флуктуации, которые проявляются за период T и принимают максимальные и минимальные значения с амплитудами равными $\Delta p_{\max} = \Delta p_{\min} \approx 0,5$ МПа. Зоны, в которых наблюдаются практически постоянные значения радиальных сил, расположенные между макси-

мумами и минимумами.

Наибольшая разница в значениях радиальной силы p_r за рассматриваемый период T можно наблюдать в начале и конце периода (при $t = 0$ и $0,01$ с) $\Delta p_r \approx 0,5$ МПа по отношению к середине периода ($t = T/2 = 0,005$ с) – $\Delta p_r \approx 1,5$ МПа.

Относительно угловой координаты ϑ флуктуация максимумов и минимумов ϑ за рассматриваемый период T составляет $\pm 7^\circ$.

Статическая деформация статора электродвигателя по направлению ротора (т.е. притяжение) за период T происходит на постоянную величину, относительно которой за период $T = 1/\omega_1$ происходят колебания деформации максимальных и минимальных значений радиальных сил.

При наличии несимметрии тока (рис. 4) происходят амплитудные и фазовые изменения в распределении радиальных сил. Изменения амплитуды модуляции радиальных сил за период колебаний при увеличении уровня несимметрии до 100 % (обрыв фазы) составляет $\Delta p_r \approx 0,7$ МПа, уменьшаясь от середины к началу или концу периода, что меньше чем при симметричном режиме (см. рис. 3), более чем в 2 раза. Значения максимумов и минимумов при этом не равны и составляют примерно 0,4 МПа для $\Delta p_{r\max}$ и примерно 0,5 МПа для $\Delta p_{r\min}$. Угловые координаты ϑ , максимумов $\Delta p_{r\max}$ и минимумов $\Delta p_{r\min}$ за период T не изменяются и равны значениям углов ϑ , приведенных ранее.

С увеличением уровня несимметрии чередование максимумов и минимумов радиальных сил p_r смещается от середины периода T ($t = 0,005$ с) на величину $T/4$ (см. рис. 4), (рис. 5).

На рис. 6 и 7 представлены распределения радиальных сил в разные моменты периода колебаний: при несимметрии фаз 0 % и 100 % соответственно. Из круговых диаграмм видно уменьшение колебаний радиальной силы в зонах полюсов машины при обрыве фазы. На ротор действует только постоянная составляющая p_r , что может при наличии нагрузки или при старте привести к «опрокидыванию» (остановке, невозможности запуска) двигателя.

Спектральный анализ колебаний радиальных сил

Анализ неравномерно распределенных в воздушном зазоре машины периодических силовых возмущений в границах одного межполюсного деления допустимо проводить рассматривая их мгновенные значения (со смещением на угол, равный половине межполюсного расстояния – $\pi/4$) или их интегральные значения на тех же интервалах (см. рис. 5).

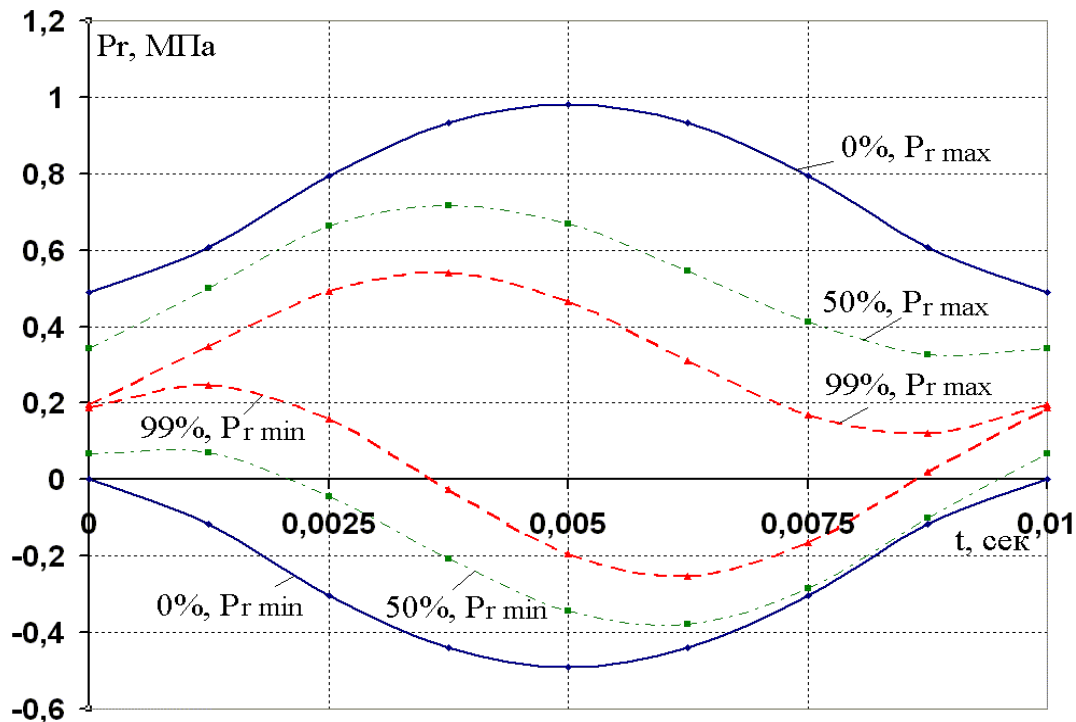


Рис. 5. Амплитудная характеристика радиальных сил за период T при уровне несимметрии тока в фазах 0, 50, 100 %

Fig. 5. Amplitude characteristic of radial forces for the period T at the level of current asymmetry in phases 0, 50 and 100 %

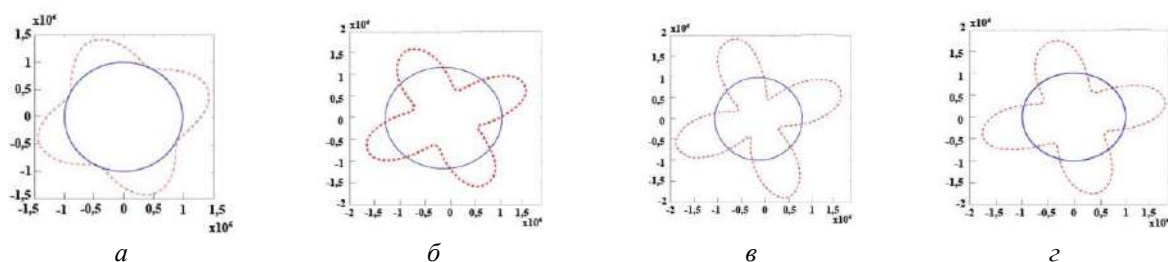


Рис. 6. Круговые диаграммы распределения радиальных сил p_r в воздушном зазоре при отсутствии несимметрии тока в фазах:

a – соответственно в начале и в конце периода – $t = T = 0$ с, $t = T = 0,01$ с;
 $б$ – $t = T/4 = 0,0025$ с; $в$ – $t = T/2 = 0,005$ с; $г$ – $t = 3T/4 = 0,0075$ с

Fig. 6. Circular diagrams of the distribution of radial forces p_r in the air gap in the absence of current asymmetry in the phases:

a – respectively at the beginning and at the end of the period – $t = T = 0$; $t = T = 0,01$ s;
 $б$ – $t = T/4 = 0,0025$ s; $в$ – $t = T/2 = 0,005$ s; $г$ – $t = 3T/4 = 0,0075$ s

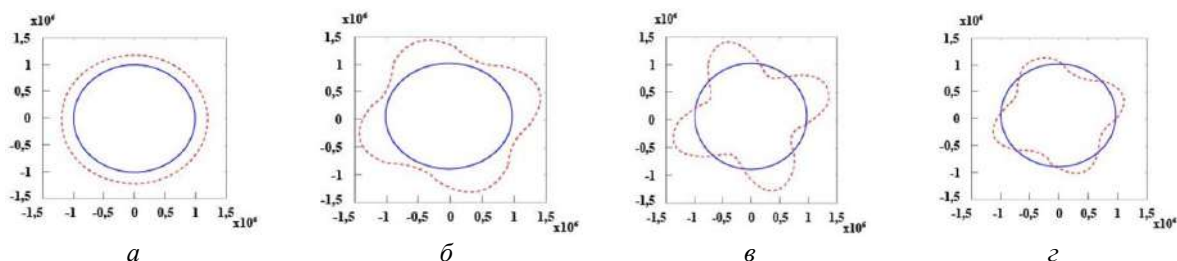


Рис. 7. Круговые диаграммы распределения радиальных сил p_r в воздушном зазоре при несимметрии тока в фазах 100 %:

a – соответственно в начале и в конце периода – $t = T = 0$ с, $t = T = 0,01$ с;
 $б$ – $t = T/4 = 0,0025$ с; $в$ – $t = T/2 = 0,005$ с; $г$ – $t = 3T/4 = 0,0075$ с

Fig. 7. Circular diagrams of the distribution of radial forces p_r in the air gap with a current asymmetry in the phases of 100 %:

a – respectively at the beginning and at the end of the period – $t = T = 0$; $t = T = 0,01$ s;
 $б$ – $t = T/4 = 0,0025$ s; $в$ – $t = T/2 = 0,005$ s; $г$ – $t = 3T/4 = 0,0075$ s

Для определения с большей точностью (достоверностью) степени влияния колебаний радиальных сил P_r на возникновение силовых волн необходимо произвести анализ их интегрального усредненного значения за период T [1, 4, 6] и действующих на угле, соответствующем межполюсному делению ($\vartheta = 90^\circ$).

Для этого выражение (1) необходимо проинтегрировать по углу ϑ [8]:

$$\int_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} P_r(\vartheta) d\vartheta = \frac{a_0}{2} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) \cdot (B_1^2 + B_2^2) +$$

$$+ \frac{a_0 B_1 B_2}{p} \sin p(\vartheta_1 - \vartheta_0) \cdot \cos[\varphi_{b_1} + \varphi_{b_2} - p(\vartheta_1 + \vartheta_0)] +$$

$$+ \frac{a_0 B_1^2}{2p} \sin p(\vartheta_1 - \vartheta_0) \cdot \cos[2\omega_1 t + 2\varphi_{b_1} - p(\vartheta_1 + \vartheta_0)] +$$

$$+ \frac{a_0 B_2^2}{2p} \sin p(\vartheta_1 - \vartheta_0) \cdot \cos[2\omega_1 t - 2\varphi_{b_2} + p(\vartheta_1 + \vartheta_0)] +$$

$$+ a_0 B_1 B_2 \cdot \cos(2\omega_1 t + \varphi_{b_1} - \varphi_{b_2}) \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0)$$

Проинтегрированная в интервале $\vartheta = 0 - \pi/2$ радиальная сила P_r позволяет перейти от системы распределенных сил, действующих по всей окружности воздушного зазора, к вращающимся эквивалентным сосредоточенным силам $P_{r\Sigma\min}$ и $P_{r\Sigma\max}$ с шагом $T/2$ относительно магнитного поля статора (рис. 8) [1, 4, 5, 9, 10].

На рис. 8 кроме интегральных сил $P_{r\Sigma\max}$ и $P_{r\Sigma\min}$ представлена их результирующая $P_{r\Sigma}$ при дефекте «обрыв фазы» (несимметрия 100 %). Эта результирующая $P_{r\Sigma}$ создает колебания радиальных сил P_r по всей длине окружности воздушного зазора, деформирующих ярмо статора. Определить ее значения можно по выражению:

$$P_{r\Sigma} = \int_0^{\pi/4} p_r(\vartheta) d\vartheta + \int_0^{\pi/2} p_r(\vartheta) d\vartheta = P_{r\Sigma\max} + P_{r\Sigma\min}$$

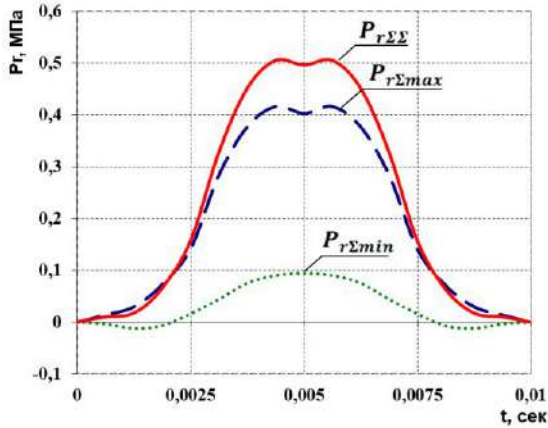


Рис. 8. График изменения интегральных сил $P_{r\Sigma\min}$, $P_{r\Sigma\max}$ и результирующей $P_{r\Sigma\Sigma}$ при обрыве фазы
Fig. 8. Graph of changes in the integral forces $P_{r\Sigma\min}$, $P_{r\Sigma\max}$ and the resulting $P_{r\Sigma\Sigma}$ under phase breakage

Рассмотрим спектральный состав периодической функции $P_{r\Sigma\Sigma}$ (рис. 9). Вокруг частоты электромагнитного поля 100 Гц и ее гармоник 200 и 300 Гц наблюдаются модуляционные (боковые) гармоники с частотным интервалом $\pm n \cdot f_s$, $n = 1, 2$, где f_s – частота вращения магнитного поля статора (25 Гц), которая при отсутствии нагрузки совпадает с оборотной частотой вращения ротора $f_1 = f_s (1 - s)$ [1, 2, 11, 12].

На спектре присутствуют характерные для данного дефекта пики на гармонических частотах 100, 200, 300 и 400 Гц с амплитудами $P_r = 0,23$ (100 %); 0,043 (18,7 %); 0,017 (7,4 %); 0,008(3,2 %) МПа соответственно. Соотношение гармоник n -ых гармонических пиков относительно пика на 100 Гц можно представить уравнением:

$$A_{n100} = A_{100} \cdot \left(\begin{array}{l} -5,7 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 5,6 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + \\ + 1,9 \cdot 10^{-2} \cdot x + 2,4 \end{array} \right),$$

где A_{n100} – амплитуда n -ой гармоники колебаний радиальной силы ($n = 2, 3, 4$); A_{100} – амплитуда 1-ой гармоники на частоте 100 Гц; x – частота, Гц.

Для электродвигателя АИР90Л4У3 с числом пар полюсов $p = 2$ формами радиальных колебаний $r = 2pi$ при $i = 0, 1, 2, 3$ [1, 2, 5, 13] будут 0, 4, 8, 12.

Форме $r = 0$ соответствуют колебания радиальных сил одновременно по всему кольцевому зазору между ротором и статором. В табл. приведены максимальные $P_{r\Sigma\max}$, минимальные $P_{r\Sigma\min}$ и средние $P_{r\Sigma\text{ср}}$ значения интегральных радиальных сил для четырех низших форм колебаний в случае максимальной несимметрии тока (100 %).

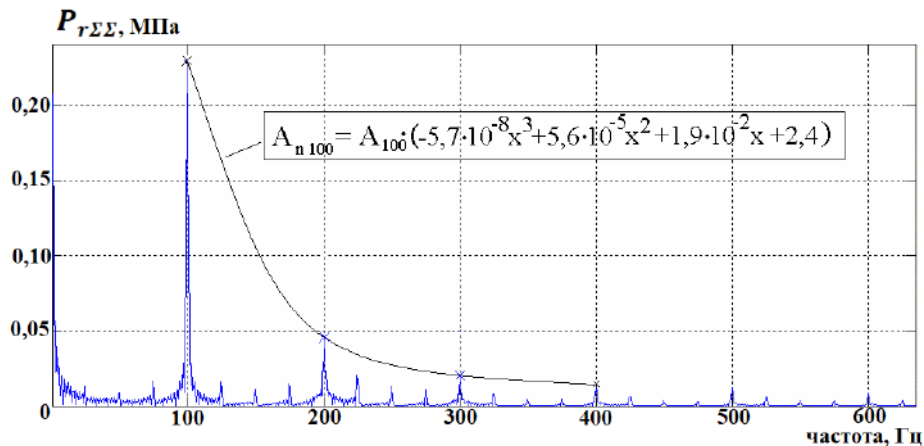


Рис.9. Спектр аналитической модели $P_{r\Sigma\Sigma}$ периодических радиальных сил
Fig.9. Spectrum of the analytical model of radial forces

Численные значения радиальных сил электродвигателя АИР90Л4У3 при обрыве фазы
 Numerical values of radial forces of the AIR90L4UZ electric motor at phase break

Форма колебаний r Form of oscillations r	Диапазон угла ϑ_0 , град в соответствии с формой r Angle range ϑ_0 , degrees, according to the shape r	$P_{r\Sigma\max}$, [кН/м ²]	$P_{r\Sigma\min}$, [кН/м ²]	$P_{r\Sigma\text{ср}}$, [кН/м ²]
0	0 – 360	2,07	0,002	1,04
4	0 – 45	0,40	0,092	0,25
8	0 – 22,5	0,1	0,031	0,06
12	0 – 15	0,06	0,011	0,04

Экспериментальное исследование вибрации электродвигателя

Проведены экспериментальные исследования пространственной вибрации АЭД АИР90L4УЗ с использованием шестиканальной виброаппаратуры СТД-2160, работающей в режиме записи вибросигналов датчиков вибрации (рис. 10) [2, 14].

Периодические электромагнитные радиальные силы, действующие в зазоре между статором и ротором [5, 10], регистрировались пьезоакселерометрами, установленными на подшипниковых щитах электродвигателя в вертикальном и горизонтальном направлениях [1, 3,

15]. Дополнительно регистрировались также осевые и окружные колебания. Максимальные вибрации при 100 % несимметрии (обрыв фазы) зарегистрированы в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Радиальные силы превышают тангенциальные силы и вызывают деформации статора по нескольким низшим формам. Ввиду того, что радиальные деформации стабильны по углу ϑ , статор будет максимально деформироваться и совершать преимущественно колебания низкой формы $r = 4$.

На рис. 11 приведен спектр вибрации электродвигателя в вертикальном направлении.



Рис. 10. Экспериментальные исследования пространственной вибрации асинхронного электродвигателя АИР90L4УЗ:

1, 5 – датчики горизонтальной вибрации; 2 – осевой датчик (не виден);

3, 6 – датчики вертикальной вибрации; 4 – датчик тангенциальной вибрации

Fig. 10. Experimental studies of spatial vibration of asynchronous electric motor AIR90L4UZ:

1, 5 – horizontal vibration sensors; 2 – axial vibration sensor (not visible);

3, 6 – vertical vibration sensors; 4 – tangential vibration sensor

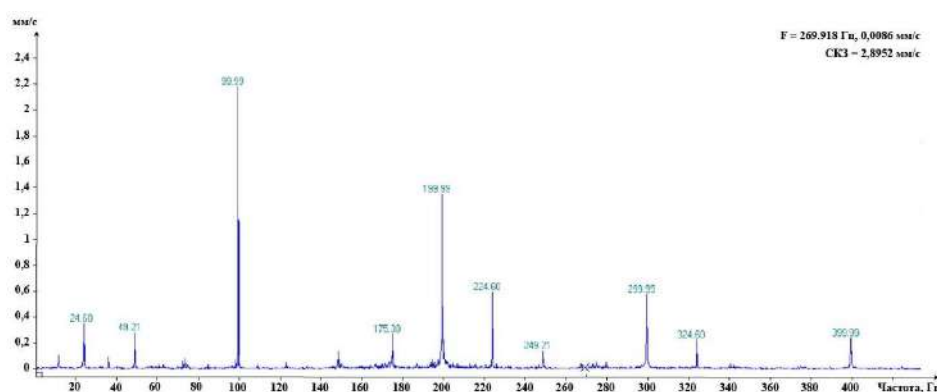


Рис. 11. Спектр колебаний электродвигателя в вертикальном направлении под действием радиальных сил

Fig. 11. The spectrum of oscillations of the electric motor in the vertical direction under the influence of radial

На спектре видны спектральные составляющие механических колебаний на оборотной частоте f_1 (24,6 Гц) и его второй гармоники: $2f_1$ (49,2 Гц), а также на электрических частотах $2kf_c \pm n f_1$, $k = 1, 2, 3, 4$, $n = 1, 2$, модулированных оборотной частотой и ее 2-ой гармоникой, где f_c – частота сети (100; 175,4; 200; 224,6; 249,2; 300; 324; 400 Гц).

Численное моделирование деформации статора при несимметрии тока в фазах

Численное моделирование максимальных радиальных деформаций корпуса статора в незакрепленном состоянии с использованием метода конечных элементов [16–18] при полученных ранее значениях радиальных сил (несимметрия 100 %) $P_{r\Sigma\max}$ и $P_{r\Sigma\min}$ (см. табл.) проведено при приложении сил по схеме (рис. 12). Результаты моделирования деформации статора приведены для форм радиальных колебаний: $r = 4, 8, 12$, что соответствует частотам $f = 100$ Гц (рис. 13); $f = 200$ Гц (рис. 14); $f = 300$ Гц (рис. 15) [1, 2, 4].

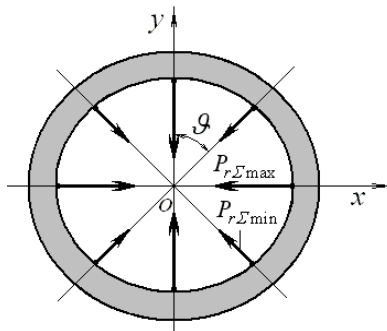


Рис. 12. Схема действия радиальных сил $P_{r\Sigma\max}$ и $P_{r\Sigma\min}$, приложенных к внутренней поверхности статора ($r = 4$)

Fig. 12. Scheme of action of radial forces $P_{r\Sigma\max}$ and $P_{r\Sigma\min}$ applied to the inner surface of the stator ($r = 4$)

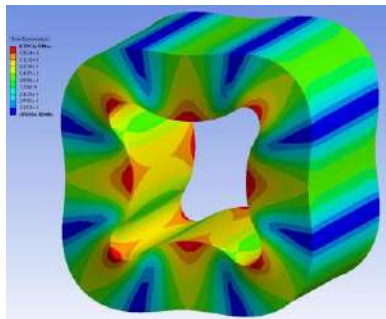


Рис. 13. Деформация статора радиальными силами ($r = 4$)

Fig. 13. Deformation of the stator by radial forces ($r = 4$)

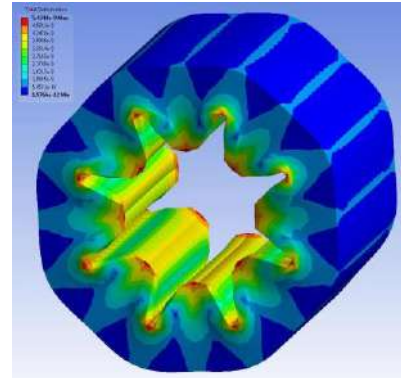


Рис. 14. Деформация статора радиальными силами ($r = 8$)

Fig. 14. Deformation of the stator by radial forces ($r = 8$)

Деформация статора при действии радиальных сил будет суммой статической деформации сжатия от постоянной составляющей радиальных сил и периодической деформации от действия переменной составляющей радиальных сил каждой формы [2]. Максимальная деформация статора (рис. 13) будет при радиальных колебаниях по форме $r = 4$ (частота 100 Гц).

Деформация статора при действии радиальных сил по форме $r = 8$ (200 Гц) будет незначительной по амплитуде (рис. 14), но более высокочастотной, при этом виброускорение (а значит и динамическая составляющая колебаний) увеличится в 4 раза.

При радиальных колебаниях по форме $r = 12$ (300 Гц) периодические радиальные деформации статора почти не будут передаваться на внешнюю поверхность (рис. 15), но вызовут внутренние межвитковые радиальные колебания обмотки статора, что увеличит вероятность короткого замыкания обмоток.

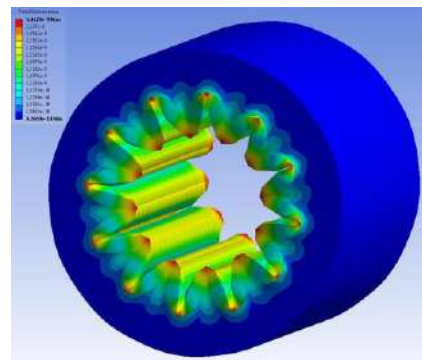


Рис. 15. Результирующая деформация статора от действия радиальных сил ($r = 12$)

Fig. 15. The resulting deformation of the stator from the action of radial forces ($r = 12$)

Суммируя выводы по численному моделированию радиальных колебаний, можно заключить, что колебания более высоких форм $r = 8, 12, \dots$ являются проявлениями нелинейных силовых взаимодействий в ярме статора с убывающими амплитудами.

Тепловизионные исследования асинхронного электродвигателя при несимметрии тока

Температура статорной обмотки по внешнему корпусу АЭД хотя и распределена равномерно (рис. 16), но за три минуты работы (обмотка видна в отверстиях в корпусе в контактной коробке) увеличилась с 41° до 86° и приближается к критической (рис. 17).

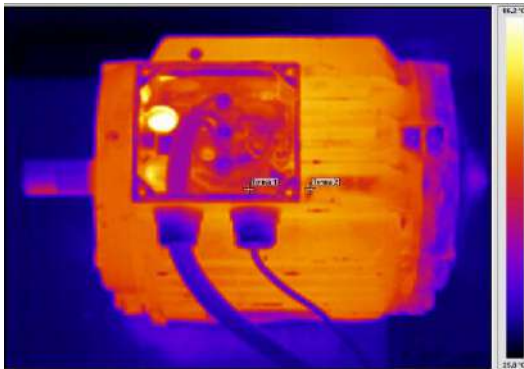


Рис. 16. Температура корпуса и статора (видна в отверстии корпуса) электродвигателя при несимметрии 100 %

Fig. 16. The temperature of the housing and stator (visible in the housing opening) of the electric motor with an asymmetry of 100 %

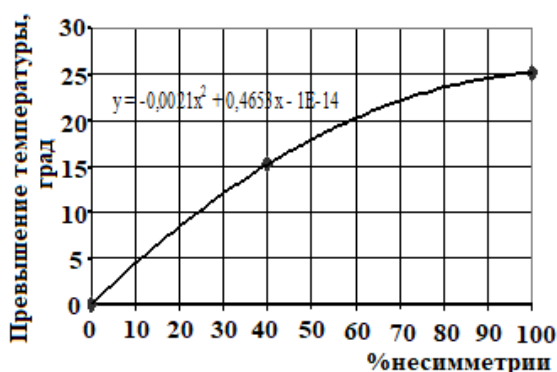


Рис. 17. График превышения температуры статорной обмотки при несимметрии 100 % по сравнению с работой в симметричном режиме (по данным эксперимента)

Fig. 17. Graph of exceeding the temperature of the stator winding with an asymmetry of 100% compared to operation in symmetrical mode (according to experimental data)

Таким образом, несимметрия тока приводит к потерям в АЭД не только путем увеличения вибрации, но и за счет избыточного увеличения температуры обмотки и рассеяния тепла при конвекционном теплообмене с окружающей средой [19, 20]. При этом возрастает вероятность короткого межвиткового замыкания обмотки при нарушении изоляции.

Заключение

Результаты исследований, представленные в настоящей работе, позволяют сделать следующие выводы. Получены более точные уравнения постоянных и переменных компонентов радиальных сил электромагнитной природы, которые дают более высокие значения радиальных сил в АЭД при несимметрии тока в фазах. При воздействии радиальных сил на статор и вращающийся ротор возникает вибрация в широком диапазоне частот с модуляцией гармоник электромагнитных колебаний 100, 200, 300, 400 Гц боковыми гармониками оборотной частоты. Последние вибропризнаки особенно характерны при значительной несимметрии фазного тока, близкой к 100 %, что создает дополнительные динамические нагрузки, отрицательно влияющие на ресурс подшипников.

Получены трехмерные графики радиальных сил, иллюстрирующие их амплитудно-фазовое распределение при возрастающей несимметрии тока в фазах. Теоретические и экспериментальные исследования вибрации при увеличении несимметрии тока в фазах показали весь спектральный состав возникающих радиальных колебаний, являющийся достаточным диагностическим признаком степени развития данного дефекта.

Проведено численное конечно-элементное моделирование колебаний ярма статора при различных формах радиальных колебаний. Выявлено, что колебания низшей формы (100 Гц) характеризуются высокими амплитудами, а колебания по более высоким формам (200, 300, 400 Гц) хотя и незначительны по амплитуде, но создают более высокие динамические нагрузки при межвитковых колебаниях обмоток статора. Тепловизионные исследования при обрыве фазы показали быстрое нарастание температуры обмотки статора с возрастающей вероятностью оплавления изоляции обмоток статора и короткого замыкания обмоток.

Список литературы

1. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
2. Бельский И.О., Лукьянов А.В. Математическое, численное и натурное моделирование параметров магнитного поля при несимметрии тока в фазах асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 44–55.
3. Nandi S., Toliyat A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review // IEEE transactions on energy conversion. 2005. Vol. 20, № 4. Pp. 32–37.
4. Лукьянов А.В., Мухачев Ю.С., Бельский И.О. Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 61–69.
5. Kelvin C. Maliti Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: Doctoral Dissertation // Royal Institute of Technology. Stockholm, 2000. 209 p.
6. Бельский И.О., Куприянов И.С., Лукьянов А.В. Исследование угловой скорости и магнитного поля при дефектах асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 4 (40). С. 62–69.
7. Вольдек А.И. Электрические машины. Л. : Энергия, 1978. 832 с.
8. Асинхронные двигатели серии 4А / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин и др. М. : Энергоатомиздат, 1982. 504 с.
9. Кетков Ю.Л. Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 7 – программирование, численные методы. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 752 с.
10. On the use of slot harmonics as a potential indicator of rotor bar breakage in the induction machine / A. Khezzer, M.Y. Kaikaa, M. Boucherma et al. // IEEE Trans. Ind. Electron. 2009. Vol. 56, № 11. P. 4592–4605.
11. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы электрических системах. М. : Энергия, 1970. 520 с.
12. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. 2005. № 1 (31). С. 50–52.
13. Benbouzid M. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis // IEEE Trans. EnergyConvers. 1999. Vol. 14, № 4. Pp. 1065–1074.
14. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. Пермь : Вибро-Центр, 1996. 176 с.
15. Сафарбаков А.М., Лукьянов А.В., Пахомов С.В. Основы технической диагностики деталей и оборудования. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2007. 128 с.
16. Simulation and fault detection of three-phase induction motors / B. Liang, B. Payne, A. Ball et al // Mathematics and Computers in Simulation. 2002. № 61. Pp. 1–15.
17. Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles : master's Thesis. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2014. 68 p.
18. Martinez J., Belahcen A., Arkkio A. A 2D FEM model for transient and fault analysis of Induction machines. Przegląd Elektrotechniczny. 2012. Vol. 88 (7B). Pp. 157–160.
19. Неразрушающий контроль и диагностика / под ред. В.В.Клюева. М. : Машиностроение, 2005. 656 с.
20. Гирник А.С., Рапорт О.Л. Математическое моделирование работы трёхфазных вспомогательных электрических машин на электровозе 2ЭС5К в условиях асимметричного питания // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2009. Т. 314. № 4. С. 69–73.

References

1. Shubov I.G. Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin [Noise and vibration of electrical machines]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986. 208 p.
2. Bel'skii I.O., Luk'yanov A.V. Matematicheskoe, chislennoe i naturnoe modelirovanie parametrov magnitnogo polya pri nesimmetrii toka v fazakh asinkhronnykh elektrodvigatelei [Mathematical, numerical and full-scale modeling of magnetic field parameters in the asynchronous electric motors with nonsymmetrical current phases]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 2 (38), pp. 44–55.
3. Nandi S., Toliyat A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review. *IEEE transactions on energy conversion*. 2005, vol. 20, no. 4, pp. 32–37.
4. Luk'yanov A.V., Muhachev Yu.S., Bel'skii I.O. Issledovanie kompleksa parametrov vibratsii i vneshnego magnitnogo polya v zadachakh diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelei [Researching the complex of vibration parameters and external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014, no 2 (22), pp. 61–69.
5. Kelvin C. Maliti Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: Doctoral Dissertation. Royal Institute of Technology. Stockholm, 2000. 209 p.
6. Bel'skii I.O., Kupriyanov I.S., Luk'yanov A.V. Issledovanie uglovoi skorosti i magnitnogo polya pri defektakh asinkhronnykh elektrodvigatelei [Researching the complex of vibration parameters and external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 4 (40), pp. 62–69.
7. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1978. 832p.
8. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Aфонin V.I., Sobolevskaya Ye.A. Asinkhronnye dvigateli serii 4A [Asynchronous motors of the 4A series]. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 504 p.
9. Ketkov Yu.L., Ketkov A.Yu., Shul'ts M.M. MATLAB 7 – programmirovaniye, chislennyye metody [MATLAB 7 – programming, numerical methods]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg Publ., 2005. 752 p.
10. Khezzer A., Kaikaa M.Y., Boucherma M., Razik H. On the use of slot harmonics as a potential indicator of rotor bar breakage in the induction machine. *IEEE Trans. Ind. Electron*. 2009, vol. 56, no. 11, pp. 4592–4605.

11. Ul'yanov S.A. Elektromagnitnye perekhodnye protsessy elektricheskikh sistemakh [Electromagnetic transient processes in electrical systems]. Moscow: Energiya Publ., 1970. 520 p.
12. Petuhov V.S., Sokolov V.A. Diagnostika sostoyaniya elektrodvigately. Metod spektral'nogo analiza potrebyaemogo toka [Diagnosis of the condition of electric motors. Method of spectral analysis of consumed current]. *Novosti elektrotehniki* [The News of Electrical Engineering], 2005, no. 1 (31), pp. 50–52.
13. Benbouzid M. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis. *IEEE Trans. EnergyConvers.* 1999, vol. 14, no. 4, pp. 1065–1074.
14. Rusov V.A. Spektral'naya vibrodiagnostika [Spectral vibrodiagnostics]. Perm': Vibro-Tsentr Publ., 1996. 176 p.
15. Safarbakov A.M., Luk'yanov A.V., Pakhomov S.V. Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki detalei i oborudovaniya [Fundamentals of technical diagnostics of parts and equipment]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2007. 128 p.
16. Liang B., Payne B., Ball A. et al. Simulation and fault detection of three-phase induction motors. *Mathematics and Computers in Simulation.* 2002, no. 61, pp. 1–15.
17. Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles : master's Thesis. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2014. 68 p.
18. Martinez J., Belahcen A., Arkkio A. A 2D FEM model for transient and fault analysis of Induction machines. *Przegląd Elektrotechniczny.* 2012, vol. 88 (7B), pp. 157–160.
19. Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika [Non-destructive testing and diagnostics]. Edited by V.V. Klyuev. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2005. 656 p.
20. Girmik A.S., Rapoport O.L. Matematicheskoe modelirovanie raboty trekhfaznykh vspomogatel'nykh elektricheskikh mashin na elektrovoze 2ES5K v usloviyakh asimmetrichnogo pitaniya [Mathematical modeling of the operation of three-phase auxiliary electrical machines on an electric locomotive 2ES5K under conditions of asymmetric power]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletins of the Tomsk Polytechnic University], 2009, vol. 314, no. 4, pp. 69–73.

Информация об авторах

Лукьянов Анатолий Валерианович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: loukian@inbox.ru.

Куприянов Иван Сергеевич, старший преподаватель кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: xpress14@mail.ru.

Лукьянов Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, ведущий технолог Технологической службы Управления Восточно-Сибирской железной дороги, Иркутск; e-mail: loukian@live.ru.

Information about the authors

Anatolii V. Luk'yanov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: loukian@inbox.ru.

Ivan S. Kupriyanov, Assistant Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: xpress14@mail.ru.

Dmitrii A. Luk'yanov, Ph.D. in Engineering Science, Leading Technologist of the Technological Service of the Management of the East Siberian Railway, Irkutsk; e-mail: loukian@live.ru.

Анализ крутильных колебаний деталей автомобильной трансмиссии с гидротрансформатором

А.А. Реутов✉

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация

✉bgtu2012@yandex.ru

Резюме

В статье представлены математическая и компьютерная модели для анализа крутильных колебаний автомобильной трансмиссии с планетарным редуктором и гидротрансформатором. Целью работы является анализ влияния неравномерности вращения коленвала двигателя на крутильные колебания деталей автомобильной трансмиссии с планетарным редуктором и гидротрансформатором. Компьютерное моделирование проводилось с использованием программного комплекса «Универсальный механизм». Проанализированы вынужденные крутильные колебания деталей трансмиссии во временной и частотной областях, вычислены статистические характеристики крутильных колебаний и собственные частоты трансмиссии для разных передач. Определены диапазоны значений угловой скорости коленвала, для которых осцилляции угловых скоростей и ускорений деталей трансмиссии имеют наибольшие значения. Использование гидротрансформатора позволяет существенно снижать быстрые осцилляции угловых скоростей и ускорений деталей трансмиссии. Угловые ускорения при блокировании гидротрансформатора возрастают сильнее, чем угловые скорости. При спектральном анализе крутильных колебаний автомобильной трансмиссии для определения значения шага представления результатов решающим является условие превышения частотой дискретизации удвоенного значения наибольшей частоты преобразуемой переменной. Модули спектров угловых ускорений турбины и других деталей передачи имеют до трех гармоник с амплитудами больше 0,1 амплитуды первой гармоники при заблокированном гидротрансформаторе. При разблокированном гидротрансформаторе модули спектров угловых ускорений не имеют высших гармоник с амплитудой больше 0,1 амплитуды первой гармоники. Результаты компьютерного моделирования могут быть использованы при проектировании автомобильных трансмиссий.

Ключевые слова

компьютерная модель, трансмиссия автомобиля, гидротрансформатор, вынужденные крутильные колебания, спектральная плотность

Для цитирования

Реутов А.А. Анализ крутильных колебаний деталей автомобильной трансмиссии с гидротрансформатором / А.А. Реутов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 23–34. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).23-34.

Информация о статье

поступила в редакцию: 8.12.2022 г.; поступила после рецензирования: 26.12.2022 г.; принята к публикации: 27.12.2022 г.

Analysis of torsional vibration of the automobile transmission parts with torque converter

А.А. Reutov✉

Bryansk State Technical University, Bryansk, the Russian Federation

✉bgtu2012@yandex.ru

Abstract

Mathematical and computer models are presented to analyze vibrations of an automobile transmission with a planetary reductor and hydraulic torque converter. The aim of the work is to analyze the influence of rotation unevenness of the engine crankshaft on the torsional vibrations of parts of an automobile transmission with a planetary reductor and hydraulic torque converter. The work was carried out by the method of computer simulation using the software «Universal Mechanism». The analysis of forced torsional vibrations of transmission parts in the time and frequency domains is carried out. Statistical characteristics of torsional vibrations and transmission natural frequencies for different gears are calculated. The ranges of the crankshaft angular velocity values are determined, for which the oscillations of the angular velocities and accelerations of the transmission parts have the highest values. The use of hydraulic torque converter makes it possible to significantly reduce the rapid oscillations of angular velocities and accelerations of transmission parts. Angular accelerations increase more strongly than angular velocities when blocking hydraulic torque converter. In the spectral analysis of the automobile transmission torsional vibrations, to determine the step value for presenting the results, the determinant is the condition of the sampling frequency exceeding the doubled value of the highest frequency of the converted variable. The spectra modules of angular accelerations of the turbine and other transmission parts have up to 3 harmonics with amplitudes greater than 0,1 of the 1st harmonic amplitude with the hydraulic torque con-

verter blocked. When the hydraulic torque converter is unlocked, the modules of the angular acceleration spectra do not have higher harmonics with an amplitude greater than 0,1 of the 1st harmonic amplitude. The computer simulation results can be used while designing automotive transmissions.

Keywords

computer dynamic model, automobile transmission, hydraulic torque converter, forced torsional vibrations, spectral density

For citation

Reutov A.A. Analiz krutil'nykh kolebaniy detalei avtomobil'noi transmissii s gidrotransformatorom [Analysis of torsional vibration of the automobile transmission parts with torque converter]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 23–34. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).23-34.

Article Info

Received: December 8, 2022; Revised: December 27, 2022; Accepted: December 28, 2022.

Введение

Многие конструкции трансмиссий современных автомобилей содержат гидротрансформатор (ГТ) и планетарный редуктор. Высокочастотные крутильные колебания трансмиссии являются давно известным негативным явлением, ускоряющим износ узлов автомобиля и ухудшающим комфортность поездок водителей и пассажиров. Вибрацию элементов трансмиссии вызывают неравномерность работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС), несбалансированность вращающихся деталей, неточность изготовления зубчатых колес и другие причины. Диапазон частот шума трансмиссии автомобиля составляет от 500 до 5 000 Гц.

Основными способами снижения вибрации и шума являются усовершенствование системы воспламенения топлива в ДВС, оптимизация жесткости и демпфирования сцепления, повышение точности изготовления зубчатых передач и подшипников, увеличение момента инерции маховика и нажимного диска сцепления, вязкости масла [1, 2].

Трансмиссия автомобиля является многомассовой нелинейной динамической системой с упруго-диссипативными связями. Математические модели трансмиссии автомобиля с планетарным редуктором и ГТ для исследования процесса переключения передач разработаны в [1–6]. Теоретические и экспериментальные исследования выявили резонансные явления при близости значений частот периодических возмущений ДВС и собственных частот (СЧ) крутильных колебаний трансмиссии. Анализ динамических процессов при пуске двигателя проведен в [2, 7] с использованием простой модели с четырьмя степенями свободы. Моделирование показало наличие быстрых и медленных переходных процессов.

Динамическая модель с четырьмя степенями свободы разработана в [8] для исследования крутильной вибрации автомобиля. Линейная система уравнений использована для анализа влияния жесткости и коэффициента демпфирования сцепления на амплитудно-частотные характеристики элементов трансмиссии. Расчеты показали, что наибольшая амплитуда крутильной вибрации входного вала трансмиссии соответствует третьей гармонике. Исследования подтвердили известные положения, что увеличение инерции маховика и жесткости муфты сцепления эффективно снижают крутильную вибрацию трансмиссии.

Большое количество элементов трансмиссии осложняет вибрационный анализ, так как каждый элемент имеет собственный спектр вибрации, а в процессе движения проявляется модуляция колебаний. Методы анализа сигналов вибрации во временной и частотной областях рассмотрены в [9].

Демпфирование нелинейных крутильных колебаний автоматической трансмиссии автомобиля, рассмотренное в [10], показало, что использование упруго-диссипативного элемента (УДЭ) малой жесткости снижает флуктуации скорости вращения, но требует значительного пространства для размещения. Исследования вибрации трансмиссии автобуса с гидромеханической передачей [11] выявили, что ГТ не является эффективным фильтром переменной составляющей крутящего момента двигателя. При разгоне автобуса на второй передаче с незаблокированным ГТ имел место резонанс крутильных колебаний карданного вала с частотой 125 Гц, возбуждаемый основной гармоникой четвертого порядка V-образного восьмицилиндрового двигателя. При резонансе отношение максимальной амплитуды к средней величине

крутящего момента достигало 70 %.

Влияние ГТ на низшие гармоники вибрации трансмиссии автомобиля исследованы в [12]. Представлены математические модели трансмиссии как многомассовой дискретной системы с двумя и тремя степенями свободы. Для получения передаточной функции системы и демпфирующих характеристик ГТ использована линеаризация уравнений. Моделирование показало демпфирование ГТ высокочастотной вибрации, генерируемой двигателем. Решение нелинейных уравнений с использованием Matlab/Simulink показало хорошее совпадение с линеаризованными уравнениями.

В [13] представлены аналитические и экспериментальные исследования субгармонических вибраций автомобильной трансмиссии с нелинейными УДЭ. Исследования, проведенные с использованием системы с одной степенью свободы и пружин, создающих кусочно-линейную характеристику жесткости с двумя участками, выявили субгармонические вибрации порядка 1/2. Уменьшение жесткости пружин и увеличение коэффициента демпфирования могут снизить амплитуду субгармонической вибрации.

Целью работы является анализ влияния неравномерности вращения коленвала двигателя на крутильные колебания деталей автомобильной трансмиссии с планетарным редуктором и ГТ.

Компьютерная модель трансмиссии автомобиля

Модель трансмиссии включает коленвал двигателя, насосное и турбинное колеса ГТ, муфту блокировки ГТ, трехрядный планетарный редуктор, главную передачу, маховик, фрикционы планетарного редуктора, тормоз колес. На рис. 1 показана структурная схема автомобильной трансмиссии с ГТ и трехрядным планетарным механизмом компании «Allison».

Математическая модель трансмиссии приведена в [4]. Модель представляет движение автомобиля на прямолинейном участке дороги, поэтому передаточное отношение и коэффициент полезного действия главной передачи учитывают характеристики дифференциала. Угловая скорость маховика равна угловой скорости колес, а приведенный момент инерции маховика представляет инерционные свойства всего автомобиля. Упруго-диссипативные свойства колес представлены УДЭ Sp .

Неравномерность крутящего момента ДВС M_e рассматривалась в [14]. Традиционно коленвал ДВС моделируют набором дискретных инерционных элементов [15], что снижает точность результатов. Трехмерная модель коленвала многоцилиндрового ДВС повышает точность вычисления параметров жесткости коленвала. Крутильные колебания коленвала дизельного двигателя рассмотрены в [16] с использованием мно-

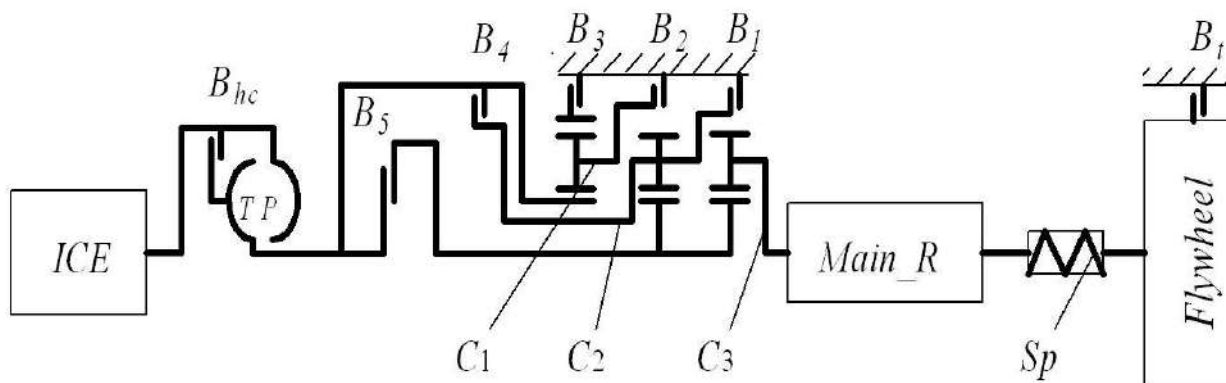


Рис. 1. Структурная схема трансмиссии автомобиля с гидротрансформатором:

ICE – коленвал двигателя; P и T – насосное и турбинное колеса гидротрансформатора;

B_{hc} – фрикцион гидротрансформатора; $B_1 – B_5$ – фрикционы планетарного редуктора;

B_t – тормоз колес; $Main_R$ – главная передача; $Flywheel$ – маховик;

$C_1 – C_3$ – водила 1 – 3 планетарных рядов; Sp – упруго-диссипативный элемент колес автомобиля

Fig. 1. Structural diagram of the automobile transmission with a hydraulic torque converter:

ICE – an engine crankshaft; P & T – pump and turbine wheels of hydraulic torque converter;

B_{hc} – the hydraulic torque converter clutch; $B_1 – B_5$ – planetary gear clutches, B_t – the wheel brake;

$Main_R$ – main gear, $C_1 – C_3$ – carriers of 1 – 3 of planetary gear sets;

Sp – elastic-dissipative element of vehicle wheels

гомассовой динамической модели. Крутильная жесткость секций коленвала рассчитана на основе конечно-элементной модели. С учетом изменения давления газов в цилиндрах двигателя получена зависимость крутящего момента двигателя от времени. Эту многомассовую модель коленвала ДВС можно использовать для исследования крутильных колебаний трансмиссии.

В общем случае крутящий момент как функцию времени $M_e(t)$ представим рядом Фурье без учета гармоник четырнадцатого и более высоких порядков [17].

Рассмотрим первую гармонику разложения $M_e(t)$ в ряд Фурье, тогда для четырехцилиндрового четырехтактного ДВС:

$$M_e(t) = M_n[1 + k_m \cos(2\omega_e t)], \quad (1)$$

где M_n – усредненная за полный оборот коленвала величина крутящего момента ДВС (функция времени t , угловой скорости коленвала ω_e и уровня подачи топлива); k_m – коэффициент неравномерности крутящего момента.

Вместо силового возбуждения (1) применим кинематическое возбуждение вынужденных колебаний трансмиссии, задав периодическое изменение угловой скорости коленвала, соответствующее (1):

$$\omega_e(t) = \omega_m[1 + k_\omega \sin(2\omega_m t)],$$

где ω_m – средняя угловая скорость коленвала; k_ω – коэффициент неравномерности угловой скорости коленвала.

Компьютерная динамическая модель трансмиссии автомобиля разработана в среде программного комплекса «Универсальный механизм» (УМ). Модель содержит 19 тел:

- коленчатый вал двигателя;
- колесо турбины ГТ (далее – турбина);

- шесть дисков фрикционов;
- диск тормоза колеса;
- солнечная шестерня;
- три водила;
- три сателлита;
- корончатое колесо;
- выходной вал главной передачи;
- маховик.

Каждый многодисковый фрикцион представлен одним диском с эквивалентными параметрами, каждый планетарный ряд редуктора содержит один сателлит с эквивалентными параметрами.

Коленвал двигателя, турбина, корончатое колесо, выходной вал главной передачи соединены с рамой автомобиля шарнирами вращения. Маховик соединен шарниром вращения и УДЭ с выходным валом главной передачи. К маховику приложен скалярный момент сопротивления движению автомобиля.

ГТ, планетарный редуктор и главная передача заданы специальными силами «Гидродинамический трансформатор», «Зубчатые колеса» и «Механическая передача вращения» [18]. Силы трения фрикционов и тормоза колеса реализованы контактными силовыми элементами «точки – плоскость».

Анализ крутильных колебаний во временной области

Проведем моделирование крутильных колебаний трансмиссии. Используются следующие основные исходные данные:

1. Приведенные моменты инерции коленвала ДВС с насосным колесом ГТ – 10; колеса турбины ГТ – 0,89; выходного вала главной передачи – 1; маховика – 132.

Таблица 1. Средние квадратические отклонения угловых скоростей деталей трансмиссии

Table 1. Standard deviations of the transmission parts' angular velocity

Передача Gear	ω_m	w_Ice	w_Turbine	w_Carrier	w_Out
1	90	6,35	2,0/5,33	0,67/3,41	0,11/0,57
3	185	6,35	1,29/5,09	0,86/3,16	0,14/0,53
5	335	6,35	0,93/1,53	1,38/3,88	0,23/0,65

Таблица 2. Средние квадратические отклонения угловых ускорений деталей трансмиссии

Table 2. Standard deviations of the transmission parts' angular acceleration

Передача Gear	ω_m	e_{Ice}	$e_{Turbine}$	$e_{Carrier}$	e_{Out}
1	90	1143	83,2/1042	11,5/731	1,92/122
3	185	2347	226/1901	95,0/1177	15,8/196
5	335	4255	136/1165	280/2616	46,7/436

2. Активный диаметр ГТ – 0,4 м.

3. Передаточные числа передач с учетом главной передачи и дифференциала: $u_R = 27,12$; $u_1 = 18,6$; $u_2 = 10,86$; $u_3 = 8,46$; $u_4 = 6,0$; $u_5 = 4,26$; $u_6 = 3,66$.

4. Коэффициенты сопротивления вращению зубчатых колес и водил – 0,005; коэффициент сопротивления выходного вала трансмиссии – 0,01; коэффициенты жесткости и диссипации УДЭ $Sp = 10^4$ и 10^3 .

Для анализа крутильных колебаний во временной области вычислим средние квадратические отклонения (СКО) угловых скоростей и ускорений деталей трансмиссии. В табл. 1 и 2 приведены СКО рассчитанных значений угловых скоростей (w_{Ice} , $w_{Turbine}$, $w_{Carrier}$, w_{Out}) и угловых ускорений (e_{Ice} , $e_{Turbine}$, $e_{Carrier}$, e_{Out}) коленвала, турбины, выходного вала редуктора, выходного вала главной передачи для первой, третьей и пятой передач. Все значения приведены в единицах международной системы. В числителе указаны значения без блокировки ГТ, в знаменателе – с заблокированным ГТ. Переходные процессы при включении передачи и блокировании ГТ не учитывались.

При блокировании ГТ СКО угловых скоростей и ускорений увеличиваются существенно. Так, блокировка ГТ на первой передаче увеличивает $w_{Carrier}$ и w_{Out} в 5,09 и 5,18 раза соответственно, а $e_{Carrier}$ и e_{Out} в 63,6 и 63,5 раза. Увеличение СКО угловых ускорений при блокировании ГТ больше, чем увеличение СКО угловых скоростей.

Эти результаты, в отличие от [11], показывают, что ГТ может снижать быстрые осцилляции угловых скоростей и ускорений коленвала.

На рис. 2 и 3 приведены зависимости СКО угловых скоростей и угловых ускорений коленвала, турбины, выходного вала редуктора от средней угловой скорости коленвала ω_m на первой передаче при разблокированном и заблокированном ГТ.

Из рис. 2 и 3 следует, что СКО угловых скоростей и угловых ускорений турбины, выходного вала редуктора существенно возрастают в диапазоне значений средней угловой скорости коленвала $\omega_m \in [90; 127]$ на первой передаче при заблокированном ГТ.

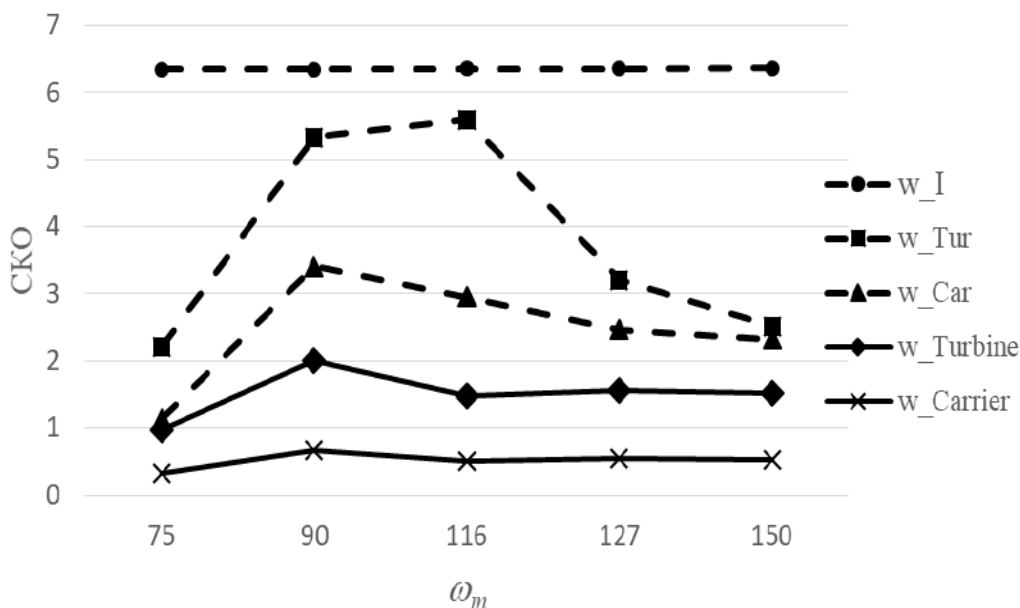


Рис. 2. Зависимости среднеквадратических отклонений угловых скоростей коленвала, турбины, выходного вала редуктора от средней угловой скорости коленвала ω_m на первой передаче при заблокированном гидротрансформаторе (пунктирные линии w_I , w_Tur , w_Car) и разблокированном гидротрансформаторе (сплошные линии $w_Turbine$, $w_Carrier$)

Fig. 2. Dependences of the angular velocity standard deviation of the crankshaft, turbine and gearbox output shaft on the crankshaft average velocity ω_m in the first gear: (dashed lines w_I , w_Tur , w_Car) with locked hydraulic torque converter (solid lines $w_Turbine$, $w_Carrier$)

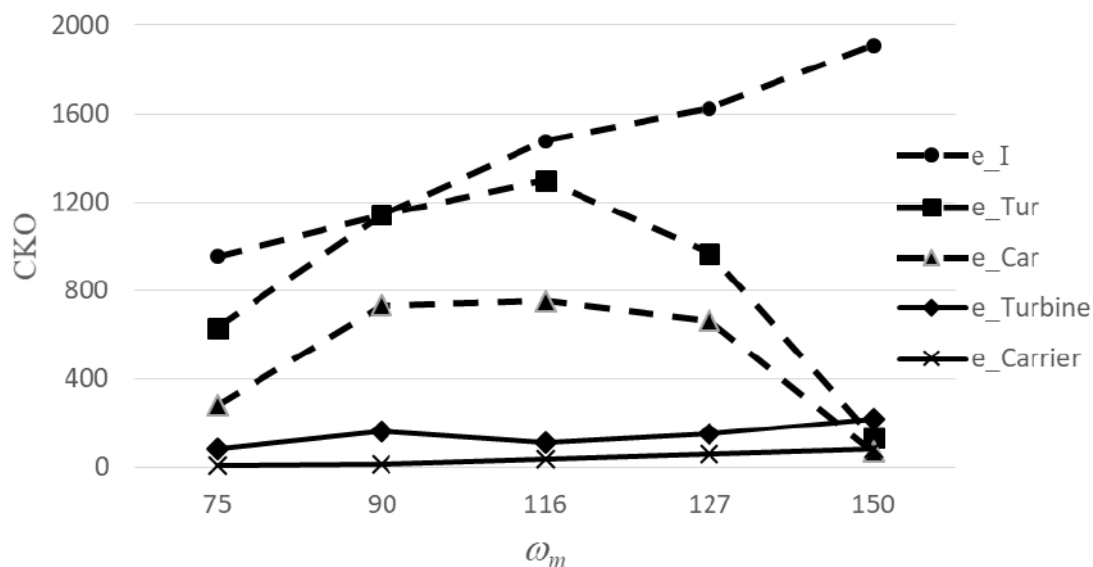


Рис. 3. Зависимости среднеквадратических отклонений угловых ускорений коленвала, турбины, выходного вала редуктора от средней угловой скорости коленвала ω_m на первой передаче при заблокированном гидротрансформаторе (пунктирные линии e_I, e_Tur, e_Car) и разблокированном гидротрансформаторе (сплошные линии e_Turbine, e_Carrier)

Fig. 3. Dependences of the angular acceleration standard deviation of the crankshaft, turbine and gearbox output shaft on the crankshaft average angular velocity ω_m in the first gear: (dashed lines e_I, e_Tur, e_Car) with locked hydraulic torque converter, (solid lines e_Turbine, e_Carrier) with unlocked hydraulic torque converter

Анализ крутильных колебаний в частотной области

Для анализа крутильных колебаний трансмиссии в частотной области вычислим приближенные значения СЧ с использованием линеаризованной системы уравнений движения трансмиссии в окрестности стационарного

движения без учета сил, зависящих от скорости, и неконсервативных сил. Моделирование крутильных колебаний трансмиссии проведем на каждой передаче отдельно так, чтобы средняя величина угловой скорости ω_m оставалась постоянной.

Таблица 3. Собственные частоты в диапазоне от 0–1 000 Гц

Table 3. Natural frequencies in the range 0–1 000 Hz

Передача Gear	Наличие / отсутствие блокировки гидротрансформатора Blocking/unblocking of hydrolic torque converter	Частоты Frequencies									
Первая First	Разблокирован Unblocked	0,59	1,38	11,9	36,0	79,8	109,8	158,1	242,0	393,8	936,6
	Заблокирован Blocked	1,38	3,87	36,0	57,7	81,0	109,8	160,9	242,1	393,8	936,6
Третья Third	Разблокирован Unblocked	0,50	1,38	23,0	36,0	56,6	107,7	165,7	241,4	393,8	936,6
	Заблокирован Blocked	1,38	7,22	36,0	49,2	69,6	167,9	241,5	394,0	936,6	–
Пятая Fifth	Разблокирован Unblocked	0,57	1,56	36,0	71,7	92,2	150,9	171,9	283,8	936,6	–
	Заблокирован Blocked	1,53	33,6	36,0	78,9	98,7	151,6	174,2	283,8	936,6	–

В табл. 3 приведены значения СЧ, вычисленные для первой, третьей и пятой передач. Отрицательные и нулевые значения СЧ, а также значения больше 1 000 Гц в табл. 3 не приведены.

Значения СЧ зависят от структурной схемы трансмиссии, поэтому разные передачи имеют различные наборы СЧ. Отдельные СЧ сохраняют значения для нескольких передач. Например, СЧ четвертой гармоники $\nu_4 = 36$ Гц для всех передач, $\nu_{10} = 394$ Гц для 1–4 передач.

Блокировка ГТ изменяет набор СЧ. Так, на первой передаче исчезли СЧ 0,59 и 11,9 Гц, но добавились СЧ 3,87 и 57,7 Гц. Значения высших частот изменяются незначительно.

Спектральный анализ позволяет выделить отдельные составляющие колебаний и их частоты. Если выборка анализируемых значений (например, угловых ускорений) содержит нецелое число периодов (вращения коленвала), то происходит искажение спектра в виде боковых лепестков. Так как передаточные отношения отдельных деталей трансмиссии к коленвалу являются разными нецелыми числами, то сформировать выборку с целыми числами периодов всех деталей невозможно.

В настоящей работе частота преобразуемой переменной (частота крутящего момента коленвала четырехцилиндрового четырехтактного ДВС) равна ω_m/π Гц. Частота преобразуемой переменной детали трансмиссии равна $\omega_m/\eta\pi$, где η – передаточное отношение (отношение угловой скорости коленвала к угловой скорости детали). Например, в рассматриваемых примерах при заблокированном ГТ без учета упругости деталей $\eta = \{1; 0,61; 3,66\}$ для турбины, выходного вала редуктора и выходного вала главной передачи при включенной шестой передаче. При разблокированном ГТ и с учетом упругости деталей передаточные отношения η непрерывно изменяются из-за изменения передаточного отношения ГТ и крутильных колебаний. Это искажает спектры анализируемых величин. Частота дискретизации преобразуемой переменной равна $1/t_r$, где t_r – шаг представления результатов. Шаг по времени представления результатов задают в инспекторе моделирования УМ.

Частота преобразуемой переменной детали трансмиссии изменяется в пределах, определяемых изменением ω_m и η . Для корректного

дискретного преобразования Фурье наибольшее значение частоты преобразуемой переменной детали не должно превышать половину частоты ее дискретизации [9], т. е. $\max(2\omega_m/\eta\pi) \leq 1/t_r$, поэтому:

$$t_r \leq \pi / \max(2\omega_m/\eta). \quad (2)$$

Если $\max(\omega_m) = 530$ рад/с для бензинового ДВС, $\min(\eta) = 0,61$ для выходного вала планетарного редуктора, то $t_r \leq 0,0018$ с. В противном случае в спектре сигнала появляются ложные составляющие.

Для разделения в спектре близких по частоте гармонических составляющих анализируемой переменной необходимо учитывать частотное разрешение модели, характеризуемое шириной полосы спектра $\Delta\omega = f_1 - f_2$, где f_1 и f_2 – близкие частоты гармонических составляющих. Для большинства задач вибрационного мониторинга достаточно частотное разрешение равно 0,1 частоты вращения детали $\Delta\omega \leq \omega_m / (10\pi)$. Частота дискретизации переменной должна превышать $\Delta\omega$, поэтому:

$$t_r \leq 10\pi / \max(\omega_m/\eta). \quad (3)$$

Для рассматриваемого примера $t_r \leq 0,036$ с.

Из (2) и (3) следует, что при спектральном анализе крутильных колебаний для определения значения шага представления результатов решающим является условие (2) превышения частотой дискретизации удвоенного значения наибольшей частоты преобразуемой переменной.

Для повышения качества спектрального анализа можно использовать следящую коррективную t_r так, чтобы за один оборот коленвала или другой детали количество дискретных значений переменной оставалось неизменным. Это позволит построить синхронный с частотой вращения спектр, в котором ось абсолютных частот заменена на ось гармоник, кратных частоте вращения. Однако средствами УМ это сделать невозможно.

В табл. 4 приведены значения модуля спектра угловых скоростей коленвала, турбины, выходного вала редуктора (sw_Ice , $sw_Turbine$, $sw_Carrier$) и соответствующие им частоты. Величина a модуля спектра на частоте b обозначена a_b . Во всех примерах СКО угловой скорости коленвала $w_Ice = 6,35$. Амплитуды гармоник меньше 0,1 амплитуды первой гармоники в табл. 4 не приведены. Амплитуды гармоник меньше 0,1 амплитуды первой гармоники в табл. 4 не приведены.

Почти у всех примеров одна доминирующая первая гармоника. Третья гармоника с амплитудой больше 0,1 амплитуды первой гармоники проявилась на первой передаче с заблокированным ГТ.

В табл. 5 приведены значения модуля спектра угловых ускорений коленвала, турбины, выходного вала редуктора, выходного вала главной передачи, (se_{Ice} , $se_{Turbine}$, $se_{Carrier}$, se_{Out}) и соответствующие им частоты.

Таблица 4. Значения модуля спектра угловых скоростей
Table 4. Values of the modulus of the angular velocity spectrum

Передача Gear	Наличие / отсутствие блокировки гидротрансформатора Blocking/unblocking of hydrolic torque converter	ω_m	sw_{Ice}	$sw_{Turbine}$	$sw_{Carrier}$
Первая First	Разблокирован Unblocked	90	3,66_28,6	0,09_28,6	0,04_28,6
	Заблокирован Blocked	90	3,7_28,6	3,4_28,6 0,25_85,4	2,2_28,6 0,33_85,4
	Разблокирован Unblocked	150	4,1_47,7	0,41_47,7	0,18_47,7
	Заблокирован Blocked	150	4,2_47,7	1,66_47,7	1,47_47,7
Третья Third	Разблокирован Unblocked	185	3,37_58,9	0,29_58,9	0,14_58,9
	Заблокирован Blocked	185	4,14_58,9	3,36_58,9	2,1_58,9
Пятая Fifth	Разблокирован Unblocked	335	3,44_106,6	0,10_106,6	0,23_106,6
	Заблокирован Blocked	335	4,1_106,6	1,33_106,6	3,40_106,6

Таблица 5. Значения модуля спектра угловых ускорений
Table 5. Values of the modulus of the angular acceleration spectrum

Передача Gear	Наличие / отсутствие блокировки гидротрансформатора Blocking/unblocking of hydrolic torque converter	ω_m	se_{Ice}	$se_{Turbine}$	$se_{Carrier}$	se_{Out}
Первая First	Разблокирован Unblocked	90	673_28,6	10,1_28,6 5,76_77,7 7,85_98	6,4_28,6	1,07_28,6
	Заблокирован Blocked	90	673_28,6	625_28,6 134_85,4 64_142	404,5_28,6 181,3_85,4 83,3_200,6	67,4_28,6 30,3_85,4 13,9_200,6
	Разблокирован Unblocked	150	1249_47,7	129_47,7	54,4_47,7	9,1_47,7
	Заблокирован Blocked	150	1257_47,7	491_47,7 230_143 151_239	448_47,7 235_143 155_239	446_47,7 79_143 146_239
Третья Third	Разблокирован Unblocked	185	1259_58,9	111_58,9	50,7_58,9	8,2_58,9
	Заблокирован Blocked	185	1549_58,9	1240_58,9 132_176,7	770_58,9	127_58,9
Пятая Fifth	Разблокирован Unblocked	335	2320_106,6	61_106,6	151_106,6	25_106,6
	Заблокирован Blocked	335	2757_106,6	880_106,6 205_33 336_180	2260_106,6 253_180	375_106,6 41_180

В табл. 5 приведены три наибольших

значения модуля спектра для каждой детали и угловой скорости коленвала. Амплитуды гармоник меньше 0,1 амплитуды первой гармоники не приведены.

Модули спектров угловых ускорений турбины, выходного вала редуктора, выходного вала главной передачи имеют до трех гармоник (№ 1, 3 и 5) с амплитудами больше 0,1 амплитуды первой гармоники при заблокированном ГТ.

При разблокированном ГТ se_{Ice} , $se_{Turbine}$, $se_{Carrier}$, se_{Out} не имеют высших гармоник с амплитудой больше 0,1 амплитуды первой гармоники. На первой передаче с разблокированным ГТ сопоставимые амплитуды имеют две гармоники на частотах близких СЧ 79,8 и 109,8 Гц. Аналогично на пятой передаче с заблокированным ГТ сопоставимые амплитуды имеют две гармоники на частотах близких СЧ 33,6 и 174,2 Гц.

Наибольшие модули спектров угловых скоростей и ускорений соответствуют частоте возмущения на каждой передаче при заблокированном ГТ. При разблокированном ГТ появляются составляющие спектра, соответствующие одной из СЧ, превышающей частоту возмущения.

Для верификации рассчитанных значений СКО угловых скоростей и ускорений рассмотрим следующие предположения:

1. При заблокированном ГТ коленвал и турбина вращаются как одно тело и $w_{Ice} = w_{Turbine}$, $e_{Ice} = e_{Turbine}$.

2. Если переменные w_{Ice} , $w_{Turbine}$ и другие являются гармоническими функциями, например, синусоидами $\sin(vt)$, то амплитуды угловых скоростей и ускорений отличаются в v раз. Аналогично СКО угловых скоростей и ускорений деталей трансмиссии также должны отличаться в v раз.

3. Значения модуля спектра гармонической функции и ее производной отличаются в v раз, т. е. значения модуля спектров угловых скоростей и ускорений деталей трансмиссии должны отличаться в v раз. Данное предположение эквивалентно второму предположению.

Анализ результатов моделирования показал, что сделанные предположения не являются надежным средством верификации результатов моделирования крутильных колебаний автомобильной трансмиссии:

1. Отношения СКО $w_{Ice} / w_{Turbine}$ равны 1,19, 1,25, 4,15 для первой, третьей и пя-

той передач соответственно (см. табл. 2 и 3) при $v = \{180; 370; 670\}$ и заблокированном ГТ.

Отношения СКО $e_{Ice} / e_{Turbine}$ равны 1,1, 1,23, 3,65 при заблокированном ГТ.

Первое предположение с расхождением менее 25 % подтверждается для первой и третьей передач.

2. Отношения СКО e_{Ice} / w_{Ice} равны 180, 369,6, 670,1 для первой, третьей и пятой передач соответственно (см. табл. 2 и 3) при $v = \{180; 370; 670\}$ независимо от блокирования ГТ.

Отношения СКО $e_{Turbine} / w_{Turbine}$ равны 41,6, 175,2, 146,2 при разблокированном ГТ и 195,5, 373,5 и 761,4 при заблокированном ГТ.

Наибольшие расхождения со вторым предположением имеются в отношениях $e_{Turbine} / w_{Turbine} - 78,2$ и $13,6\%$ при разблокированном и заблокированном ГТ соответственно. Расхождения отношений e_{Ice} / w_{Ice} не превышают 1 %.

3. Отношения модулей спектров угловых скоростей и ускорений коленвала se_{Ice} / sw_{Ice} равны 353,4, 373,6, 674,4 для первой, третьей и пятой передач соответственно (см. табл. 4 и 5) при $v = \{300; 370; 670\}$ при разблокированном ГТ. При заблокированном ГТ se_{Ice} / sw_{Ice} равны 346,9, 369,0, 667,3.

Аналогичные отношения для турбины $se_{Turbine} / sw_{Turbine}$ равны 314,6, 382,8, 610,0 при разблокированном ГТ и 295,8, 369, 667,3 при заблокированном ГТ.

Наибольшие расхождения с первым предположением имеются в отношениях se_{Ice} / sw_{Ice} и $se_{Turbine} / sw_{Turbine} - 17,8$ и $9,0\%$ при разблокированном ГТ. В целом при заблокированном ГТ предположения 1–3 выполняются точнее.

Заключение

Разработаны математическая и компьютерная модели для анализа крутильных колебаний автомобильной трансмиссии с планетарным редуктором и ГТ. Проанализированы вынужденные крутильные колебания деталей трансмиссии во временной и частотной областях.

При анализе колебаний во временной области рассчитаны СКО угловых скоростей и ускорений деталей трансмиссии. Показано, что при блокировании ГТ СКО угловых скоростей и ускорений увеличиваются существенно. Таким образом, использование ГТ позволяет существенно снижать быстрые осцилляции угло-

вых скоростей и ускорений деталей трансмиссии. Увеличение СКО угловых ускорений при блокировании ГТ больше, чем увеличение СКО угловых скоростей.

Анализ позволил выявить диапазоны значений угловой скорости коленвала, для которых осцилляции угловых скоростей и ускорений деталей трансмиссии имеют наибольшие значения, т. е. определить диапазоны, вызывающие максимальные уровни вибрации. Так, СКО угловых скоростей и угловых ускорений турбины, выходного вала редуктора существенно возрастают в диапазоне $\omega_m \in [90; 127]$ на первой передаче при заблокированном ГТ.

При анализе крутильных колебаний трансмиссии в частотной области вычислены приближенные значения СЧ с использованием линейризованной системы уравнений движения трансмиссии, а также значения модуля спектральной плотности угловых скоростей и ускорений деталей трансмиссии. Показано, что значения СЧ зависят от структуры трансмиссии, поэтому разные передачи имеют разные наборы СЧ. Отдельные СЧ сохраняют значения для нескольких передач.

Проведен спектральный анализ крутильных колебаний и вычислены значения модуля спектра угловых скоростей и ускорений деталей трансмиссии и соответствующие им частоты. Модули спектров угловых ускорений турбины, выходного вала редуктора, выходного вала главной передачи имеют до трех гармоник (№ 1, 3 и 5) с амплитудами больше 0,1 амплитуды первой гармоники при заблокированном

ГТ. При разблокированном ГТ модули спектров этих угловых ускорений не имеют высших гармоник с амплитудой больше 0,1 амплитуды первой гармоники.

Установлено, что при спектральном анализе крутильных колебаний автомобильной трансмиссии для определения значения шага представления результатов решающим является условие (2) превышения частотой дискретизации удвоенного значения наибольшей частоты преобразуемой переменной.

Анализ результатов моделирования показал, что сделанные предположения о соотношениях СКО, значениях модуля спектральной плотности угловых скоростей и ускорений деталей трансмиссии не являются надежным средством верификации результатов моделирования крутильных колебаний автомобильной трансмиссии. Второе предположение с погрешностью менее 1 % выполняется только для коленвала. Для остальных деталей из-за упруго-демпфирующих свойств контактного силового элемента блокировки ГТ и других компонентов модели все теоретические предположения имеют большие расхождения с данными моделирования. При заблокированном ГТ предположения выполняются точнее, чем при разблокированном.

Результаты компьютерного моделирования могут быть использованы при проектировании автомобильных трансмиссий, а также для обоснования технических норм обслуживания и ремонта трансмиссий по фактическому состоянию.

Список литературы

1. Yoon J.Y., Kim B. Gear rattle analysis of a torsional system with multi-staged clutch damper in a manual transmission under the wide-open throttle condition // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016. Vol. 30 (3). Pp. 1003–1019.
2. Modeling and analysis of friction clutch at a driveline for suppressing car starting judder / L.P. Li, Z.J. Lu, X.L. Liu et al. // *Journal of Sound and Vibration*, 2018. Vol. 424. Pp. 335–351.
3. Тарасик В.П. Математическое моделирование переключения передач с перекрытием характеристик управления // *Автомобильная промышленность*. 2016. № 7. С. 10–18.
4. Реутов А.А. Моделирование переключения передач автомобильной трансмиссии с гидротрансформатором // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2022. № 2 (16). С. 27–38.
5. Реутов А.А. Моделирование переключения передач автомобильной трансмиссии с двойным сцеплением // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2021. № 3-4 (14). С. 14–24.
6. Haj-Fraj A., Pfeiffer F. A model based approach for the optimization of gearshifting in automatic transmissions // *International journal of vehicle design*. 2002. Vol. 28 (1), Pp. 171–188.
7. Li L., Singh R. Analysis of start-up transient for a powertrain system with a nonlinear clutch damper // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 62. Pp. 460–479.
8. Sezgen H.C., Tinkir M. Optimization of torsional vibration damper of cranktrain system using a hybrid damping approach // *Engineering Science and Technology*. 2021. № 24. Pp. 959–973.
9. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. СПб. : СПбГМТУ, 2004. 156 с.

10. Effect of stiffness ratio of piecewise-linear spring on the occurrence of subharmonic nonlinear vibration in automatic transmission powertrain / T. Ryu, S. Rosbi, K. Matsuzaki et al. // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 786. Pp. 156–160.
11. Иванов С.Н. Колебания и вибрации трансмиссий автомобилей // *Автомобильная промышленность*. 2009. № 8. С. 14–16.
12. Sayin P., Schoftner J. Analytical Investigation on the Damping Performance of a torque Converter in an Automotive Driveline Model // *MATEC Web of Conferences* 2017. 108:07001. DOI 10.1051/mateconf/201710807001.
13. Fundamental study of subharmonic vibration of order 1/2 in automatic transmissions for cars / T. Ryu, T. Nakae, K. Matsuzaki et al. // *Journal of Physics: Conference Series*, 2016. Vol. 744. 012206. DOI 10.1088/1742-6596/744/1/012206.
14. Mendes A.S., Meirelles P.S., Zampieri D.E. Analysis of torsional vibration in internal combustion engines: modelling and experimental validation // *Proc. IMechE Part K: Journal Multi-body Dynamics*. 2008. Vol. 222. Pp. 155–178. DOI 10.1243/14644193JMBD1.
15. Diesel engine torsional vibration control coupling with speed control system / Guo Yibin, Li Wanyou, Yu Shuwen et al. // *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017. Vol. 94. Pp. 1–13.
16. Lin, T.R., Zhang, X.W. A study of the torsional vibration of a 4-cylinder diesel engine crankshaft // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer Nature Publ, 2019. P. 383–392.
17. Brancati R., Rocca E., Lauria D. Feasibility study of the Hilbert transform in detecting the gear rattle phenomenon of automotive transmissions // *Journal of Vibration and Control*. 2018. Vol. 24 (12). Pp. 2631–2641.
18. Modeling of transmission. User's manual // *Universal mechanism* : site. URL: http://www.universalmechanism.com/download/90/eng/22_um_driveline.pdf (Дата обращения: 18.01.2022).

References

1. Yoon J.Y., Kim B. Gear rattle analysis of a torsional system with multi-staged clutch damper in a manual transmission under the wide-open throttle condition. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, vol. 30 (3), pp. 1003–1019.
2. Li L.P., Lu Z.J., Liu X.L., Sun T., Jing X. J., Shangguan W.B. Modeling and analysis of friction clutch at a driveline for suppressing car starting judder. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, vol. 424, pp. 335–351.
3. Tarasik V.P. Matematicheskoe modelirovanie pereklyucheniya peredach s perekrytiem kharakteristik upravleniya [Mathematical modeling of gearshift with overlapping control of characteristics]. *Avtomobil'naya promyshlennost'* [Automobile industry], 2016, no. 7, pp. 10–18.
4. Reutov A.A. Modelirovanie pereklyucheniya peredach avtomobilnoy transmissii s gidrotransformatorom [Simulation of gear shifting of an automobile transmission with a torque converter]. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii* [Automation and Modelling in Design and Management], 2022, no. 2 (16), pp. 27–38.
5. Reutov A.A. Modelirovanie pereklyucheniya peredach avtomobilnoi transmissii s dvoynim stsepleniem [Simulation of a dual clutch automated transmission gear shift]. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii* [Automation and Modelling in Design and Management], 2021, no. 3-4 (14), pp. 14–24.
6. Haj-Fraj A., Pfeiffer F. A model based approach for the optimization of gearshifting in automatic transmissions. *International journal of vehicle design*, 2002, vol. 28 (1), pp. 171–188.
7. Li L., Singh R. Analysis of start-up transient for a powertrain system with a nonlinear clutch damper. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, vol. 62, pp. 460–479.
8. Sezgen H.C., Tinkir M. Optimization of torsional vibration damper of cranktrain system using a hybrid damping approach. *Engineering Science and Technology*, 2021, no. 24, pp. 959–973.
9. Barkov A.V., Barkova N.A. Vibratsionnaya diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibratsii [Vibration monitoring of machines and equipment. Vibration analysis]. Saint Petersburg: SPGMTU Publ., 2004. 156 p.
10. Ryu T., Rosbi S., Matsuzaki K., Nakae T., Sueoka A., Takikawa Y., Ooi Y. Effect of stiffness ratio of piecewise-linear spring on the occurrence of subharmonic nonlinear vibration in automatic transmission powertrain. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 786, pp. 156–160.
11. Ivanov S.N. Kolebaniya i vibratsii transmissii avtomobilei [Oscillation and vibration of automotive transmissions]. *Avtomobilnaya promyshlennost'* [Automobile industry], 2009, no. 8, pp. 14–16.
12. Sayin P., Schoftner J. Analytical Investigation on the Damping Performance of a torque Converter in an Automotive Driveline Model. *MATEC Web of Conferences* 2017. 108:07001. DOI 10.1051/mateconf/201710807001.
13. Ryu T., Nakae T., Matsuzaki K., Nanba A., Takikawa Y., Ooi Y., Sueoka A. Fundamental study of subharmonic vibration of order 1/2 in automatic transmissions for cars. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 744, 012206. DOI 10.1088/1742-6596/744/1/012206.
14. Mendes A.S., Meirelles P.S., Zampieri D.E. Analysis of torsional vibration in internal combustion engines: modelling and experimental validation. *Proc. IMechE Part K: Journal Multi-body Dynamics*, 2008, vol. 222, pp. 155–178. DOI 10.1243/14644193JMBD1.
15. Yibin G., Wanyou L., Shuwen Y., Xiao H., Yunbo Y., Zhipeng W., Xiuzhen M. Diesel engine torsional vibration control coupling with speed control system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, vol. 94, pp. 1–13.
16. Lin, T.R., Zhang, X.W. A study of the torsional vibration of a 4-cylinder diesel engine crankshaft. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer Nature Publ, 2019, pp. 383–392.
17. Brancati R., Rocca E., Lauria D. Feasibility study of the Hilbert transform in detecting the gear rattle phenomenon of automotive transmissions. *Journal of Vibration and Control*, 2018, vol. 24 (12), pp. 2631–2641.

18. Modeling of transmission. User's manual. Universal mechanism: site. URL: http://www.universalmechanism.com/download/90/eng/22_um_driveline.pdf (Accessed January 18, 2022).

Информация об авторах

Реутов Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и оборудования, Брянский государственный технический университет, г. Брянск; e-mail: bgtu2012@yandex.ru.

Information about the authors

Alexander A. Reutov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Transport and Handling Machines and Equipment, Bryansk State Technical University, Bryansk; e-mail: bgtu2012@yandex.ru.

Система управления и безопасности крутонаклонных подъемников для транспортирования горной массы при разработке месторождений

В.С. Великанов^{1,2}✉, И.А. Гришин³, Н.В. Дёрина³, А.Д. Лукашук¹

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

²Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

³Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация

✉rizhik_00@mail.ru

Резюме

Одна из первоочередных задач комплекса мер по увеличению добычных мощностей при открытой разработке полезных ископаемых – повышение эффективности эксплуатации карьерного транспорта. Для расширения технологических возможностей открытых горных работ перспективным направлением является внедрение на карьерах энергоэффективных наклонных подъемников. Необходимость использования современных средств контроля и безопасности диктуется спецификой эксплуатации карьерных автомобильных подъемников. Соответственно, для обеспечения дальнейшего роста эффективности работы и поддержания уровня производственной безопасности требуется внедрение в практику современной системы управления, сигнализации и защиты. Такая система должна разрабатываться по принципам передовых технологий автоматизации, предусматривающих создание и применение информационно-управляющих систем нового поколения, реализуемых путем системной интеграции высоконадежных унифицированных микропроцессорных технических и программных средств, а также средств вычислительной техники, используемых в качестве автоматизированных рабочих мест оперативно-диспетчерского, обслуживающего и руководящего персонала. В работе рассматриваются принципы построения и устройство современной системы управления, сигнализации и защиты для автомобильных наклонных карьерных подъемников. С целью снижения себестоимости доставки полезного ископаемого на предприятиях горнодобывающей отрасли широко применяются автомобильные наклонные карьерные подъемники. В статье описываются основные факторы, на которые необходимо обратить внимание при создании современной интеллектуальной системы управления, сигнализации и защиты автомобильных наклонных карьерных подъемников.

Ключевые слова

открытая разработка полезных ископаемых, наклонный карьерный подъемник, система управления сигнализации и защиты, транспортирование горной массы

Для цитирования

Система управления и безопасности крутонаклонных подъемников для транспортирования горной массы при разработке месторождений / В.С. Великанов, И.А. Гришин, Н.В. Дёрина, А.Д. Лукашук // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 35–44. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).35-44.

Информация о статье

поступила в редакцию: 7.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 29.11.2022 г.; принята к публикации: 1.12.2022 г.

Control and safety system of high-inclined elevators for rock mass transportation during field mining

V.S. Velikanov^{1,2}✉, I.A. Grishin³, N.V. Derina³, A.D. Lukashuk¹

¹Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, the Russian Federation

²Ural State Mining University, Ekaterinburg, the Russian Federation

³Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, the Russian Federation

✉rizhik_00@mail.ru

Abstract

One of the priority tasks in a set of measures increasing the production capacity in open-pit mining is to improve the efficiency of the open-pit transport operation. To expand the technological capabilities of the open-pit mining, it is necessary to introduce energy-efficient inclined lifts in quarries. The need for the implementation of modern control and safety means is dictated by the specifics of the mining car lifts operation. Accordingly, to ensure further growth in work efficiency and the level of industrial safety, it is necessary to create and put into practice a modern control, signaling and protection system. Such system should be developed according to the principles of advanced automation technologies, providing for the creation and application of new generation informational and control systems implemented through the systemic integration of highly reliable unified microprocessor hard- and software, as well as computer equipment used as automated workplaces for

operation-dispatching, maintenance and management personnel. The paper discusses the principles of construction and arrangement of a modern control, signaling and protection system for automobile inclined mining lifts. In order to reduce the cost of delivering minerals, mining enterprises widely use automobile inclined quarry lifts. The article describes the main factors requiring attention when creating a modern intelligent control, signaling and protection system for automobile inclined mining lifts.

Keywords

open-pit mining, inclined quarry lift, control, alarm and protection system, transportation of rock mass

For citation

Velikanov V.S., Grishin I.A., Derina N.V., Lukashuk A.D. Sistema kontrolya i bezopasnosti vysokonaklonnykh elevatorov dlya transportirovki gornoj massy pri razrabotke mestorozhdenii [Control and safety system of high-inclined elevators for rock mass transportation during field mining]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 35–44. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).35-44.

Article Info

Received: September 7, 2022; Revised: November 29, 2022; Accepted: December 1, 2022.

Введение

В добыче полезных ископаемых половину от общих затрат составляют затраты на карьерный транспорт. Карьерный транспорт неразрывно связан как с технологией добычи, так и с формой карьера. Способ и схема вскрытия месторождений предусматривают использование определенных видов транспорта. В научно-технической литературе по вопросам открытой добычи к основным видам карьерного транспорта принято относить железнодорожный, автомобильный и конвейерный транспорт, применяемый самостоятельно и в различных комбинациях [1, 2]. Достаточно редко на карьерах используются канатный, гидравлический карьерный транспорт, скреперные средства доставки. Выбор вида карьерного транспорта определяется, главным образом, характеристикой транспортируемого материала, расстоянием транспортирования, масштабом и темпами перевозок (последнее предъявляет требования к маневренности транспортных средств). При неоспоримом достоинстве самоходного вида транспорта, а именно высокой маневренности, существует ряд ограничений: угол преодолеваемого уклона, высокая себестоимость, необходимость размещать на бортах карьера большое количество транспортных берм, что вызывает дополнительный их разнос. Вопросы применения карьерного транспорта и вскрытия месторождений тесно связаны. Карьерные грузопотоки осуществляются по вскрывающим выработкам. Для расширения возможности применения карьера в качестве вскрывающей выработки необходима оптимизация системы вскрытия карьера путем локализации транспортных коммуникаций на участках борта карьера [1–3]. Это возможно осуществить путем внедрения на карьерах энергоэффективных наклонных карьерных подъемников.

Идея использования наклонных карьерных подъемников не нова. Достаточно обратиться к работе [4], в которой представлен обобщенный анализ

наклонных средств транспортирования. На основе научных работ информация по машинам и оборудованию сведена в табл. 1.

В теоретической проработке вопроса наклонных карьерных подъемников приоритет принадлежит научным школам Уральского федерального округа, особенно ученым Уральского горного университета: М.В. Васильеву, В.С. Хохрякову, Б.А. Носыреву, Л.А. Сорокину, Л.И. Жукову, С.М. Кубареву, А.Г. Моору и другим ученым [5].

Для снижения себестоимости доставки полезного ископаемого на горных предприятиях могут использоваться автомобильные наклонные карьерные подъемники (АНКП). Известные примеры применения такого оборудования: плотина электростанции Токуяма в Японии, автомобильный наклонный подъемник АНК-120 Института «Унипромедь», модели подъемных установок GHD и Siemag [6, 7].

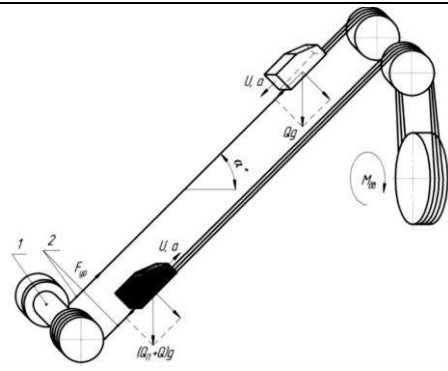
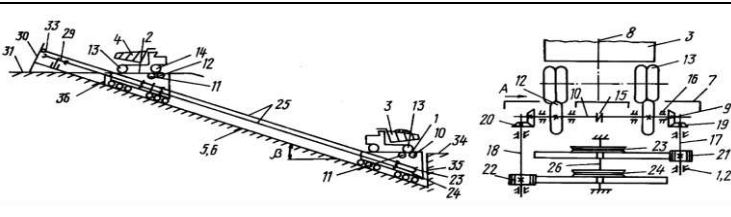
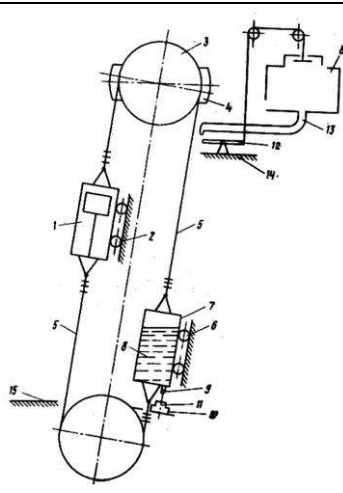
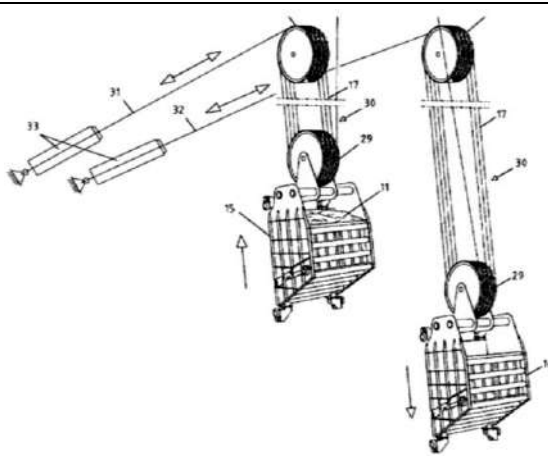
Использование АНКП позволяет:

- исключить перегрузку при транспортировании полезного ископаемого (на поверхность карьера поднимается загруженный автосамосвал, который продолжает движение до места разгрузки);
- экономить дизельное топливо и ресурсы автосамосвалов;
- уменьшить загазованность в карьере;
- сократить парк автосамосвалов.

Имеются недостатки такого вида транспорта:

- ограничение по годовой производительности подъемника;
- техническая реализация подъемника вследствие применения на карьерах автосамосвалов большой грузоподъемности;
- большая массивность установки включая бетонные и строительные конструкции;
- необходимость длительного строительства и заблаговременного формирования траншеи;
- значительные капитальные затраты;
- сложность формирования вместительного перегрузочного пункта [8].

Таблица 1. Наклонные карьерные подъемные машины и установки
Table 1. Inclined quarry hoists and installations

<p>Авторские конструкции и конструкции на различных предприятиях мира Author designs and designs at various enterprises of the world</p>	<p>Общий вид наклонных карьерных подъемных машин и установок General view of inclined quarry hoists and installations</p>
<p>Модель уравновешенной многоканатной карьерной подъемной установки с дополнительной приводной станцией [9] Model of a balanced multi-rope mining hoist with an additional drive station</p>	
<p>Модель подъемной установки с автономным приводом [10] Lifting unit model with autonomous drive</p>	
<p>Механико-гидравлический фрикционный подъемник [11] Mechanical-hydraulic friction elevator</p>	
<p>Крутонаклонная подъемная установка для открытой горной выработки [12] High-inclined hoist for open pit mining</p>	

<p>Автомобильно-клетевой подъемник АНК-120 [7] Car-cage elevator ANK-120</p>	
<p>Устройство для транспортирования грузов [13] Device for transporting goods</p>	
<p>Модель подъемной установки с цепным приводом [14] Model of lifting installation with chain drive</p>	
<p>Система скипового подъема «Thyssen krupp’s Skip Way System» [15]</p>	
<p>Наклонный карьерный подъемник (по порядку): «Siemag Tecbergtrucklift» [16]; разработка Института горного дела Уральского отделения РАН [8]; скиповой подъем по карьерной вскрывающей выработке [17–19] Inclined quarry elevator (in order): «Siemag Tecbergtrucklift»; Design by the Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; skip hoist along a quarry open mining</p>	

Материалы и методы

В данной статье нет необходимости описывать технологический процесс добычи полезных ископаемых с освещением конструктивных особенностей автомобильных наклонных подъемных установок для открытых горных работ (ОГР) и систему, охватывающую весь технологический процесс, в том числе и параметры, характеризующие работу установки.

Цель работы заключается в анализе оснащенности подъемных машин и установок системами контроля и защиты, обосновании применения средств безопасности крутонаклонных автомобильных подъемников для транспортирования горной массы в условиях ОГР.

Известны различные типы устройств для контроля и защиты вертикальных подъемных установок подземных рудников. Системы управления и защиты подъемных установок представляют комплект аппаратов, которые выполняют следующие функции:

- сбор информации о положении сосудов в стволе или на трассе подъема;
- измерение и ограничение скорости;
- задание скорости подъема для систем автоматического регулирования;
- получение различных путевых команд;

– защита от переподъема сосудов.

Все перечисленные функции связаны с получением и переработкой информации о положении подъемных сосудов в стволе, а задача управления сводится к тому, чтобы обеспечить перемещение подъемного сосуда в заданную точку с необходимой точностью. При этом параметры движения не должны выходить за пределы, определенные проектом или правилами безопасности (табл. 2) [20–23].

Защитные устройства подъемных систем могут быть разбиты на две группы:

1. Устройства, вызывающие немедленное включение предохранительного торможения, позволяющие окончить цикл подъема, в процессе которого возникла неисправность.

2. Не допускающие последующий пуск подъемной установки [20–23].

Основными направлениями развития технических средств контроля и защиты подъемов являются: повышение быстродействия, обеспечение многофункциональности, уменьшение габаритов и энергопотребления аппаратуры, повышение надежности.

Актуальность в применении современных средств контроля и безопасности диктуется спецификой эксплуатации карьерных автомобильных

Таблица 2. Устройства и аппараты управления и защиты подъемных систем

Table 2. Devices for control and protection of lifting systems

Устройство / аппарат Device	Назначение Use
Указатели глубины Depth indicators	Информируют о положении сосудов в шахтном стволе при ручном управлении подъемной системой Inform about the position of the vessels in the mine shaft under manual control of the lifting system
Скоростемеры и ограничители скорости Speedometers and speed limiters	Информируют о величине скорости при движении подъемных сосудов и записывают диаграммы ее изменения Inform about the magnitude of the speed during the movement of the lifting vessels and record diagrams of its change
Концевые выключатели Limit switches	Служат для предотвращения переподъема сосудов Prevent vessel overlifting
Регуляторы давления Pressure regulators	Управляют тормозным моментом при рабочем торможении подъемной системы Control the braking torque during the service braking of the lifting system
Аппараты задания и контроля хода Devices for setting and controlling the motion	Выдают импульсы в контролируемых точках пути движения подъемных сосудов; задают программу хода подъемной машины на максимальной и пониженной скоростях; осуществляют контроль действительной скорости во всех периодах движения; обеспечивают защиту от переподъема сосудов; производят корректировку элементов аппарата в соответствии с положением Give impulses at controlled points along the movement path of the lifting vessels; set the program for the motion of the lifting machine at maximum and reduced speeds; control the actual speed in all periods of movement; provide protection against overlifting of vessels; adjust the elements of the device in accordance with their location
Цепь защиты (предохранительная цепь) Safety chain	Комплект аппаратов защиты и блокировок, призванный надежно обеспечить предотвращение аварийных ситуаций A set of protection and interlock devices for secure prevention of accidents

подъемников. Необходимо учитывать, что современные карьерные автосамосвалы – это дорогостоящее горное оборудование, поэтому малейшая ошибка при подъеме (спуске) может привести к аварии и, соответственно, к потере или выходу из строя основного технологического оборудования (автосамосвала) и экономическому ущербу. Несмотря на огромные движущиеся массы, АНКП должна быть «послушной» в руках обслуживающего персонала, простой в управлении и надежной в эксплуатации.

В силу определенных обстоятельств в основном все карьеры, разрезы, подземные рудники и шахты входят в состав частных горнодобывающих холдингов (Уральская горно-металлургическая компания, «Норникель», «Полиметалл», Сибирская угольная энергетическая компания, АО «Южуралзолото Группа Компаний», ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» и др.), существует тенденция к решению лишь некоторых отдельно взятых, достаточно важных вопросов контроля и управления, сигнализации и связи. Это приводит к значительному росту номенклатуры разрабатываемой и эксплуатируемой аппаратуры и возникновению проблемы совместимости при работе [20]. Отсутствует также комплексный, системный подход к решению указанных задач, что приводит также к проблемам информационной, конструктивной, энергетической, эксплуатационной и эргономической совместимости разнородных систем и аппаратуры [20].

В процессе подготовки публикации не обнаружена конкретная информация о средствах контроля и безопасности, используемых в наклонных карьерных подъемных машинах и установках. Следовательно,

либо используется полностью типовое оборудование вертикального подъема, либо необходимо частичное применение технических средств шахтного подъема, интегрированных в интеллектуальную систему управления АНКП.

Полученные результаты и их обсуждение

Управление АНКП осуществляет оператор, находящийся за пультом управления. Предусмотрено управление в трех режимах: автоматическое, полуавтоматическое, ручное. Пульт оператора АНКП представляет собой конструкцию, на которой размещены панели с измерительными и сигнальными приборами, указателями положения подъемного стола на трассе, ключами и кнопками управления, и манипуляторами (джойстиком). На лицевой панели размещается монитор промышленного компьютера, а на верхней панели – клавиатура ввода / управления, есть возможность поддержания связи с диспетчером горного предприятия. Предусмотрено управление АНКП удаленно из кабины мобильного пункта управления.

Основной отличительной особенностью управления карьерным автомобильным подъемником является перемещение карьерного автосамосвала в заданную точку на поверхность без промежуточного позиционирования по трассе движения, с расположением приводной станции на поверхности карьера. Автосамосвал размещается на грузовой платформе, однако имеются и специфические варианты привода: привод платформы от ведущих колес автосамосвалов либо использование системы полнспаст для сокращения нагрузок (рис. 1).

Для создания современной интеллектуальной

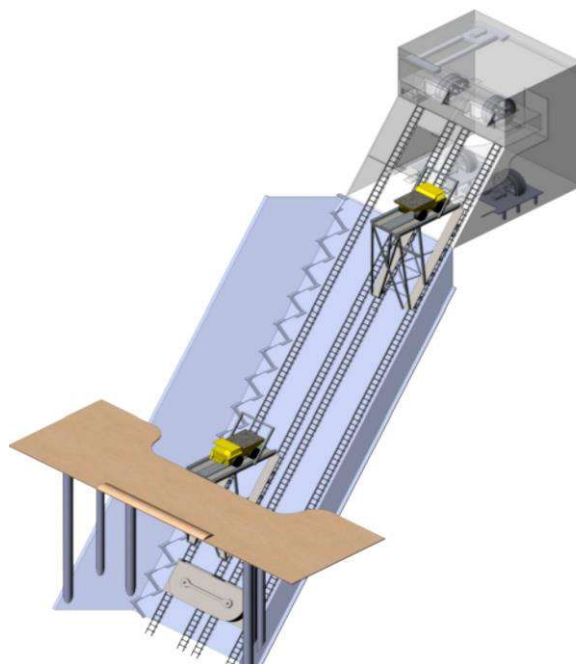


Рис. 1. Общий вид автомобильного наклонного карьерного подъемника

Fig. 1. General view of an inclined automobile quarry lift

системы управления, сигнализации и защиты (СУСиЗ) АНКП с частичной интеграцией и адаптацией устройств контроля и защиты вертикальных подъемных установок необходимо правильное определение назначения элементов системы по контролируемым параметрам и их взаимосвязь при оптимальном структурном исполнении составных частей:

- измерение контролируемого параметра, контроль сигналов датчиков останова платформы;
- диагностика сигнала, его преобразование, вычисление;
- отключение АНКП;
- сравнение измеряемых и вычисляемых параметров или количественных показателей АНКП с уставками предупредительной сигнализации (ПС) и защиты (ТЗ);
- ввод и вывод сигнализации и защиты;
- предупредительная сигнализация (световая и звуковая);
- формирование алгоритма защиты и выдача команды в программу действия защиты, задание режима работы системы на предстоящий цикл подъема;
- аварийная сигнализация (световая и звуковая), световая индикация с напоминанием, сигнализирующая отдельно о срабатывании реле защиты или реле контроля исправности;
- осуществление алгоритма программы действия защиты;
- сигнализация отключения защиты (по какому параметру отключена защита, отображается на световом табло);
- пост аварийного останова (АО);
- приведение защищаемого оборудования в безопасное состояние с помощью исполнительных органов защиты (рис. 2).

Для реализации функции контроля перегруза платформы в системе применяется автоматический

весовой контроль. СУСиЗ осуществляет автоматическое взвешивание карьерного автосамосвала с грузом при въезде на встроенные в платформу тензометрические грузоприемные устройства и определяют общую массу. При этом погрешность измерений не превышает 5 %. Информация о перегрузе отображается световой и звуковой ПС и передается по каналам связи на диспетчерский пункт предприятия. В этом случае подъем будет невозможен.

Безопасная работа подъемной установки определяется функциональным состоянием ее механического оборудования (подъемные сосуды, парашюты, стопоры, подвесные устройства, подъемные канаты, тормозная система и другие элементы подъемной установки). В табл. 1 наглядно продемонстрирована существующая традиционная практика по разработке и внедрению в производство подъемных установок, у которых в качестве тягового органа используется канат. Поэтому в работе не ставится задача описать создание и применение средств контроля состояния элементов механического оборудования подъемной установки. В литературе приводятся сведения о механическом оборудовании подъема, подлежащем контролю и защите:

- подъемный сосуд – место в стволе шахты, положение вагонетки в клетке, контроль зависания сосуда, положение сосуда в разгрузочных кривых;
- подвесные устройства – прицепные устройства, пружина парашюта;
- подъемный канат – натяжение каната, дефектоскопия каната;
- тормозная система – контроль состояния тормозной тяги и износа колодок;
- копровый шкив – подшипники, шкив.

Относительно АНКП целесообразно частичное использование средств контроля и защиты:

- подъемный канат – натяжение и дефекто-

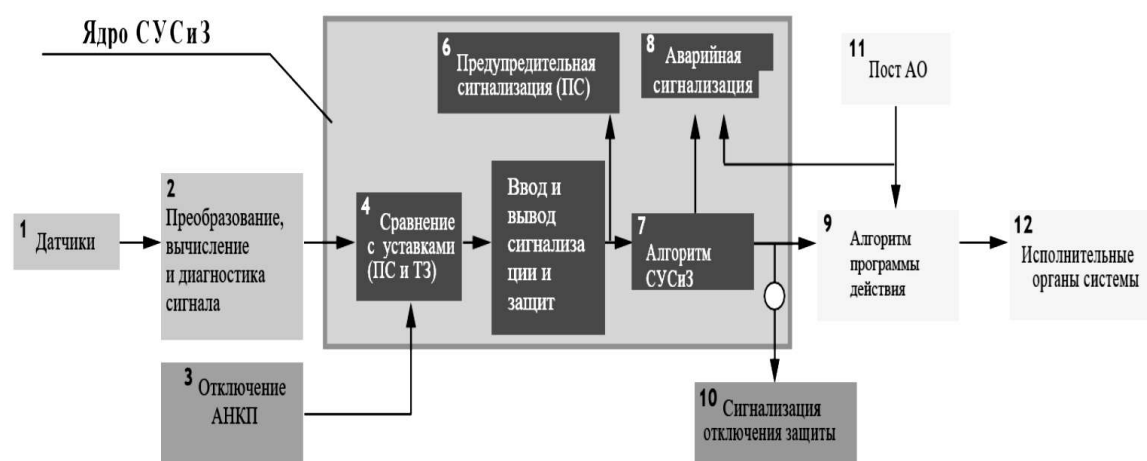


Рис. 2. Структурная схема системы управления, сигнализации и защиты

Fig. 2. Structural diagram of the control, signaling and protection system

Схема составлена авторами на основе источников [22, 23].

The scheme compiled by the authors based on sources [22, 23].

скопия;

– тормозная система – контроль состояния тормозной тяги и износа колодок;

– коренная часть подъемной машины – вал, подшипники, целостность пружины парашюта.

Заключение

В результате анализа научно-исследовательских работ и современного состояния средств управления и безопасности для транспортирования горной массы при разработке месторождений на горнодобывающих производствах установлено следующее:

1. Приоритетные направления для горных предприятий в области модернизации систем управления и безопасности наклонных подъемников для транспортирования горной массы – определение

назначения элементов системы по контролируемым параметрам и их взаимосвязь при оптимальном структурном исполнении составных частей системы.

2. В современных системах управления и безопасности наклонных подъемников для транспортирования горной массы при разработке месторождений вопросы технической реализации данных систем недостаточно рассмотрены и практически не решены.

3. Реализация комплексного подхода на основе системного анализа к выполнению указанных задач позволит решить проблему информационной, конструктивной, эксплуатационной и эргономической совместимости разнородных систем и аппаратуры.

Список литературы

1. Журавлев А.Г., Чендырев М.А. Обоснование эффективных условий применения карьерных наклонных канатных подъемников на базе компьютерного моделирования // Горн. информац.-аналит. бюл. 2021. № 5. С. 309–321.
2. Бурмистров К.В., Колодюк А.А., Аргимбаев К.Р. Выбор комплексов оборудования для производства выемочно-погрузочных работ в стесненных условиях нижних горизонтов карьеров // Вестн. Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2010. № 1 (29). С. 22–25.
3. Выбор комплекса горнотранспортного оборудования для карьеров по добыче известняка в сложных горнотехнических условиях / А.Н. Волокитин, К.С. Наумов, К.В. Бурмистров и др. // Рациональное освоение недр. 2021. № 5. С. 59–65.
4. Чендырев М.А. Оценка конструктивных параметров наклонных карьерных подъемников // Проблемы недропользования. 2020. № 2. С. 37–49.
5. Попов Ю.В. Повышение эффективности комплексов многоканатных подъемов с наземным расположением подъемных машин : автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. Екатеринбург, 2010. 34 с.
6. Чендырев М.А., Журавлев А.Г. Техничко-экономические параметры транспортирования горной массы из карьера автомобильным наклонным карьерным подъемником // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и эконом. информ. 2018. № 1. С. 33–36.
7. Эффективность автомобильно-клетевых подъемников АНК-120 на глубоких карьерах / А.Г. Сисин, В.И. Белобров, М.А. Файнблит и др. // Горный журнал. 1995. № 6. С. 19–21.
8. Чендырев М.А., Журавлев А.Г. Особенности конструкции автомобильной карьерной наклонной подъемной установки // Проблемы недропользования. 2017. № 2. С. 133–142.
9. Садыков Е.Л. Повышение эффективности многоканатных наклонных подъемных установок. Екатеринбург : УГ-ГУ, 2011. 159 с.
10. Кулешов А.А. Тарасов Ю.Д. Автомобильный карьерный подъемник с автономным приводом // Изв. высш. учеб. заведений. Горный журнал. 2001. № 1. С. 53–56.
11. А.с. 839967 СССР. Шахтный многоканатный подъемник / В.И. Вавиловский, И.С. Назаренко, А.А. Сорокин и др. № 2813637/22-03 ; заявл. 03.09.1979 ; опубл. 23.06.1981, Бюл. № 23. 3 с.
12. Пат. 2636634 Рос. Федерация. Крутонаклонная конвейерная установка для открытой горной выработки / Клаус Верре, Франц М. Вольперс, Детлеф Папажевски и др. № 2014132232 ; заявл. 30.01.2013 ; опубл. 24.11.2017, Бюл. № 33. 29 с.
13. Пат. 2069637 Рос. Федерация. Устройство для транспортирования грузов / А.Ю. Макеев, А.П. Комиссаров. № 93008412 ; заявл. 09.02.1993 ; опубл. 20.04.1995.
14. Способы повышения производительности горнотранспортного комплекса глубокого карьера / И.С. Маренков, М.С. Иванов, О.И. Ефимова и др. // Евразийский союз ученых. 2015. № 6-2 (15). С. 136–140.
15. Wolpers F. Thyssenkrupp's Skip Way System offers an alternative // Engineering and mining journal. 2016. №1. P. 32–38.
16. Siemug Trucklift system // Yumpu : site. URL:<https://www.yumpu.com/en/document/view/53586475/trucklift-system> (access date: 15.07.2022).
17. Пат. 186195 Рос. Федерация. Карьерное подъемное устройство / А.А. Гоготин, В.Н. Калмыков, С.Е. Гавришев и др. № 2017121812 ; заявл. 21.06.2017 ; опубл. 11.01.2019, Бюл. № 2. 6 с.
18. Обоснование технологических схем транспортирования горной массы с применением карьерных подъемников при разработке месторождений открытоподземным способом / С.Е. Гавришев, К.В. Бурмистров, С.Н. Корнилов и др. // Горный журнал. 2016. № 5 (2226). С. 41–47.
19. Обоснование целесообразности применения крутонаклонных подъемников в карьере при комбинированном способе разработки месторождения / С.Е. Гавришев, К.В. Бурмистров, В.А. Кидяев и др. // Горн. информац.-аналит. бюл.. 2012. № 6. С. 165–172.
20. Пахомов П.И. Методы и технические средства повышения безопасности эксплуатации рудничных подъемов. Бишкек : Кырг.-Рос. Славян. ун-т, 2000. 59 с.

21. Гришко А.П. Стационарные машины. Т. 1. Рудничные подъемные установки. М : Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2006. 477 с.
22. Лазуга И.В., Сухарев Р.Ю. Приборы и автоматизированные системы безопасности грузоподъемных машин и механизмов. Омск : СибАДИ, 2019. 232 с.
23. Гроза Л. О технологических защитах // Современные технологии автоматизации. 2014. № 1. С. 90–97.

References

1. Zhuravlev A.G., Chendyrev M.A. Obosnovaniye effektivnykh uslovii primeneniya kar'ernykh naklonnykh kanatnykh pod'emnikov na baze komp'yuternogo modelirovaniya [Substantiation of effective conditions for the use of open-pit inclined cable hoists based on computer simulation]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], 2021, no. 5, pp. 309–321.
2. Burmistrov K.V. Kolonyuk A.A., Argimbaev K.R. Vybora kompleksov oborudovaniya dlya proizvodstva vyemochpopogruzochnykh rabot v stesnennykh usloviyakh nizhnikh gorizontov kar'erov [The choice of equipment complexes for the production of excavation and loading operations in the constrained conditions of the lower horizons of quarries]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov], 2010, no. 1 (29), pp. 22–25.
3. Volokitin A.N., Naumov K.S., Burmistrov K.V., Sokolovskaya O.A., Pikalov V.A. Vybora kompleksa gornotransportnogo oborudovaniya dlya kar'erov po dobyche izvestnyaka v slozhnykh gornotekhnicheskikh usloviyakh [The choice of a complex of mining and transport equipment for limestone quarries in difficult mining conditions]. *Ratsional'noe osvoenie nedr* [Rational development of mineral resources], 2021, no. 5, pp. 59–65.
4. Chendyrev M.A. Otsenka konstruktivnykh parametrov naklonnykh kar'ernykh pod'emnikov [Estimation of design parameters of inclined mining hoists]. *Problemy nedropol'zovaniya* [Subsoil use problems], 2020, no. 2, pp. 37–49.
5. Popov Yu.V. Povyshenie effektivnosti kompleksov mnogokanatnykh pod'emov s nazemnym raspolozheniem pod'emnykh mashin [Improving the efficiency of multi-rope hoist complexes with ground-based hoisting machines]. Doctor's thesis. Ekaterinburg, 2010. 34 p.
6. Chendyrev M.A., Zhuravlev A.G. Tekhniko-ekonomicheskie parametry transportirovaniya gornoj massy iz kar'yera avtomobil'nykh naklonnykh kar'ernykh pod'emnikov [Technical and economic parameters of transportation of rock mass from a quarry by an automobile inclined quarry lift]. *Byulleten' «Chernaya metallurgiya»* [Bulletin «Ferrous metallurgy»], 2018, no. 1, pp. 33–36.
7. Sisin A.G., Belobrov V.I., Fainblit M.A., Akishev A.N. Effektivnost' avtomobil'no-klet'evykh pod'emnikov ANK-120 na glubokikh kar'erakh [Efficiency of ANK-120 car-cage lifts in deep quarries]. *Gornyi zhurnal* [Mining Magazine], 1995, no. 6, pp. 19–21.
8. Chendyrev M.A., Zhuravlev A.G. Osobennosti konstruktivnykh avtomobil'noi kar'erno naklonnoi pod'emnoi ustanovki [Design features of the automotive quarry inclined lifting unit]. *Problemy nedropol'zovaniya* [Problems of subsurface use], 2017, no. 2, pp. 133–142.
9. Sadykov E.L. Povyshenie effektivnosti mnogokanatnykh naklonnykh pod'emnykh ustanovok [Improving the efficiency of multi-channel inclined lifting installations]. Ekaterinburg: UGGU Publ., 2011. 159 p.
10. Kuleshov A.A., Tarasov Yu.D. Avtomobil'nyi kar'ernyi pod'emnik s avtonomnym privodom [Car quarry lift with autonomous drive]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [Bulletins of high educational organizations. Mining magazine], 2001, no. 1, pp. 53–56.
11. Vavilovskii V.I., Nazarenko I.S., Sorokin A.A., Yastrebov S.S., Karpov M.N., Vavilovskii V.V., Bogdanov Yu.V. Copyright certificate SU 839967 A1, 23.06.1981.
12. Verre Klaus, Vol'pers Frants M., Papazhevskii Detlef, Raats Viktor. Patent RU 2636634 C2, 24.11.2017.
13. Makeev A.Yu., Komissarov A.P. Patent RU 2069637 C1, 20.04.1995.
14. Marenkov I.S., Ivanov M.S., Efimova O.I., Bukina V.V., Andreev M.N. Sposoby povysheniya proizvoditel'nosti gornotransportnogo kompleksa glubokogo kar'era [Ways to increase the productivity of the mining and transport complex of a deep quarry]. *Evraziiskii soyuz uchenykh* [Eurasian Union of Scientists], 2015, no. 6–2 (15), pp. 136–140.
15. Franz Wolpers. Thyssenkrupp's Skip Way System offers an alternative. *Engineering and mining journal*, 2016, no. 1, pp. 32–38.
16. Siemug Trucklift system (Electronic resource). Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/53586475/trucklift-system> (Accessed July 15, 2022).
17. Gogotin A.A., Kalmykov V.N., Gavrishev S.E., Burmistrov K.V. Patent RU 186195 U1, 11.01.2019.
18. Gavrishev S.E., Burmistrov K.V., Kornilov S.N., Tomilina N.G. Obosnovanie tekhnologicheskikh skhem transportirovaniya gornoj massy s primeneniem kar'ernykh pod'emnikov pri razrabotke mestorozhdenii otkrytopodzemnym sposobom [Substantiation of technological schemes for transporting rock mass using quarry lifts in the development of deposits by the open-ground method]. *Gornyi zhurnal* [Mining magazine], 2016, no. 5 (2226), pp. 41–47.
19. Gavrishev S.E., Burmistrov K.V., Kidyayev V.A., Tomilina N.G. Obosnovanie tselesoobraznosti primeneniya krutonaklonnykh pod'emnikov v kar'ere pri kombinirovannom sposobе razrabotki mestorozhdeniya [Justification of the expediency of using steeply inclined lifts in a quarry with a combined method of developing a deposit]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], 2012, no. 6, pp. 165–172.
20. Pakhomov P.I. Metody i tekhnicheskie sredstva povysheniya bezopasnosti ekspluatatsii rudnichnykh pod'emov [Methods and technical means for improving the safety of operation of mine hoists]. Bishkek: Kyrgyzsko-Rossiiskii Slavyanskii universitet Publ., 2000. 59 p.
21. Grishko A.P. Statsionarnye mashiny. Tom 1. Rudnichnye pod'emnye ustanovki [Stationary machines. Vol. 1. Mine lifting installations]. Moscow: MGGU Publ., 2006. 477 p.

22. Lazuta I.V., Sukharev R.Yu. Pribory i avtomatizirovannye sistemy bezopasnosti gruzopod’emnykh mashin i mekhanizmov [Devices and automated safety systems for lifting machines and mechanisms]. Omsk: SibADI Publ., 2019. 232 p.

23. Groza Leonid. O tekhnologicheskikh zashchitakh [About technological protections]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern automation technologies], 2014, no. 1, pp. 90–97.

Информация об авторах

Великанов Владимир Семенович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; e-mail: rizhik_00@mail.ru.

Гришин Игорь Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; e-mail: igorgri@mail.ru.

Дёрина Наталья Владимировна, кандидат филологических наук, доцент кафедры иностранных языков по техническим направлениям, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; e-mail: nataljapidckaluck@yandex.ru.

Лукашук Алёна Дмитриевна, кафедра подъемно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; e-mail: alenka_lukashuk@mail.ru.

Information about the authors

Vladimir S. Velikanov, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Lifting and transport machines and robots, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg; e-mail: rizhik_00@mail.ru.

Igor A. Grishin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, head of the Department of Geology, Surveying and Mineral Processing, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk; e-mail: igorgri@mail.ru.

Natal'ya V. Derina, Ph.D. in Philology, Associate Professor of the Department of Foreign languages in technical areas, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk; e-mail: nataljapidckaluck@yandex.ru.

Alena D. Lukashuk, Department of Lifting and transport machines and robots, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg; e-mail: alenka_lukashuk@mail.ru.

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

ТРАНСПОРТ

TRANSPORT

Анализ эффективности сервисной формы технического обслуживания и ремонта локомотивов

И.И. Лакин¹✉, В.В. Семченко², А.В. Раздобаров³

¹Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта, г. Москва, Российская Федерация

²АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», г. Красноярск, Российская Федерация

³Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

✉lakin16@mail.ru

Резюме

Более 170 лет эксплуатация локомотивов, их техническое обслуживание и ремонт были единым целым, поэтому проблемы, связанные с процессами эксплуатации и ремонта, были внутренними. Передача технического обслуживания и ремонта внешним, аутсорсинговым сервисным компаниям кардинально поменяла ситуацию. Возникли проблемы переходного периода, проявились как достоинства, так и недостатки новой формы хозяйствования. Основные из них рассмотрены в настоящей статье. Авторами выполнен критический анализ накопленного за последние десять лет опыта сервисного технического обслуживания и ремонта локомотивов на ОАО «Российские железные дороги». С 2014 г. техническое обслуживание и ремонт всех локомотивов на железных дорогах страны отданы на аутсорсинг компаниям «СТМ-Сервис» и «ТМХ-Сервис». Описаны особенности договоров сервисного обслуживания, главной из которых является отказ от бюджетной формы финансирования и переход на оплату за полезный пробег локомотивов. Рассматриваются «детские болезни» сервиса, которые успешно преодолеваются. Изменившиеся условия повлекли за собой и новую мотивацию к развитию локомотиворемонтного хозяйства. Главным достоинством появившейся системы технического обслуживания и ремонта стало создание диалектической пары «эксплуатация – техническое обслуживание и ремонт» по принципу «единство и борьба противоположностей». Второе достоинство – это вовлеченность заводов-изготовителей в техническое обслуживание и ремонт. Однако важным недостатком является стремление сервисных компаний получить прибыль, а не выполнить миссию. В дальнейшем предлагается перейти от сервиса к предоставлению услуг тяги. В этом случае главной диалектической парой станет пара «перевозки – услуги тяги». Предлагается на каждом полигоне иметь не менее двух компаний, предоставляющих свои локомотивы для тяги поездов с собственными показателями: стоимость пробега, допустимая масса поезда, скорость движения и др.

Ключевые слова

локомотивы, эксплуатация локомотива, сервисное техническое обслуживание и ремонт, аутсорсинговая сервисная компания

Для цитирования

Лакин И.И. Анализ эффективности сервисной формы технического обслуживания и ремонта локомотивов / И.И. Лакин, В.В. Семченко, А.В. Раздобаров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 46–56. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).46-56.

Информация о статье

поступила в редакцию: 18.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 19.12.2022 г.; принята к публикации: 20.12.2022 г.

The service form effectiveness analysis of locomotives maintenance and repair

I.I. Lakin¹✉, V.V. Semchenko², A.V. Razdobarov³

¹Railway Engineering Center, Moscow, the Russian Federation

²JSC «Road Center for the implementation of the Krasnoyarsk Railway», Krasnoyarsk, the Russian Federation

³Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

✉lakin16@mail.ru

Abstract

For more than one hundred seventy years, the operation of locomotives, their maintenance and repair have been a whole. Therefore, the problems of the relationship between operation and repair were internal. With the repair functions transferred to external, outsourcing service companies the situation has changed radically. The problems of the transition period arose, both the advantages and disadvantages of the new form of management becoming obvious. The main ones are discussed in this article. The authors have carried out a critical analysis of the experience accumulated over the past 10 years in service maintenance and repair of locomotives on domestic railways in JSC «Russian Railways». Since 2014, the repair of all Russian Railways locomotives has been outsourced to STM-Service and TMH-Service. The specifics of service contracts are described, the principal ones being the rejection of the budg-

etary form of financing and the transition to payment for the useful mileage of locomotives. The servicing problems are described, which have been successfully overcome. The changed conditions also led to a new motivation for the development of locomotive repair facilities. The main conceptual advantage of the new service repair system was the creation of a dialectical pair «Exploitation» – «maintenance and repair» based on the principle of «Unity and struggle of opposites». The second advantage is the involvement of manufacturing plants in service repair. The main drawback is the motivation of service companies to make a profit, instead of accomplishing the mission. In the future, it is proposed to switch from maintenance to providing traction services. In this case, the main dialectical pair of the new level will be «Transportation» – «Traction services». It is proposed to have at least two companies at each landfill providing their locomotives for pulling trains with their own indicators: the cost of mileage, the permissible mass of the train, the speed of movement, etc.

Keywords

locomotives, locomotive operation, service maintenance and repair, outsourcing service company

For citation

Lakin I.I., Semchenko V.V., Razdobarov A.V. Analiz effektivnosti servisnoi formy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lokomotivov [The service form effectiveness analysis of locomotives maintenance and repair]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 46–56. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).46-56.

Article Info

Received: October 18, 2022; Revised: December 19, 2022; Accepted: December 20, 2022.

Введение

Необходимость повышения эффективности локомотивного хозяйства и надежности локомотивов, снижения себестоимости технического обслуживания и ремонта (ТОиР) привели к утверждению в 2001 г. на Коллегии Министерства путей сообщения РФ Комплексной программы реорганизации и развития отечественного локомотивостроения, организации ремонта и эксплуатации тягового подвижного состава [1]. Началась реформа. С 2003 г. все локомотивные депо (ТЧ) разделены на эксплуатационные (ТЧЭ) и ремонтные (ТЧР), с 2012 г. – на сервисные локомотивные депо (СЛД). В 2008 г. на базе десяти локомотиворемонтных заводов создается ОАО «Желдорремаш» (ЖДРМ). В 2010–2011 гг. департамент локомотивного хозяйства (ЦТ) ОАО «РЖД» разделяется на два филиала: Дирекцию тяги (ЦТ) и Дирекцию по ремонту тягового подвижного состава (ЦТР).

В локомотивном хозяйстве начинает внедряться их сервисное обслуживание [2, 3], в том числе по контракту жизненного цикла (КЖЦ) [4] по аналогии с ведущими мировыми локомотивостроительными компаниями: Siemens Transportation Systems (Siemens Mobility), Alstom Transport, General Electric Transportation, Bombardier Transportation, [5, 6]. КЖЦ предполагает не только поставку, но и техническое обслуживание на этапе эксплуатации жизненного цикла локомотивов.

В 2010 г. в рамках взаимодействия ОАО «РЖД» с группой компаний «Трансмашхол-

динг» (ТМХ), который объединил «Новочеркасский электровозостроительный завод (НЭВЗ), Брянский машиностроительный завод (БМЗ), Коломенский завод (КЗ), Луганский тепловозостроительный завод (ЛТЗ) и т. д., создается компания «ТМХ-Сервис» (с 2017 г. – «ЛокоТех-Сервис») для сервисного обслуживания локомотивов производства ТМХ (2/3/4ЭС5К, 2/3ЭС4К, ЭП1в/и, 2/3ТЭ25в/и, ТЭМ18в/и, ТЭП70в/и и др.), включая ранее выпущенные, но снятые с производства серии (ВЛ10, ВЛ11, ВЛ80, ВЛ85, М62в/и), что было вызвано техническими и технологическими особенностями локомотивных депо. В 2011 г. холдинг «Синара-Транспортные машины» (СТМ), выпускающий локомотивы серий 2/3ЭС6 и 2ЭС10 (с 2010 г. – «Уральские локомотивы»), создает компанию «СТМ-Сервис». Начинается новый этап развития ТОиР отечественных локомотивов.

Эксперименты по сервисному ТОиР локомотивов проводятся в десяти пилотных депо с 2012 г. Принципиальное событие происходит в 2014 г. с передачей на полный сервис в течение 40 лет эксплуатации локомотивов ОАО «РЖД» в компании «ТМХ-Сервис» и «СТМ-Сервис» [2, 3]. Опыт сервисного обслуживания позволил в дальнейшем перейти на КЖЦ [4], являющийся мировым трендом при поставке сложной техники.

Целью статьи является дальнейшее развитие сервисных форм технического обслуживания и ремонта локомотивов на основании критического анализа опыта первых десяти лет ра-

боты. Необходимо исправить допущенные ошибки и развивать преимущества перспективной формы хозяйствования.

Принципы сервисного технического обслуживания и ремонта

До сервисного обслуживания ТООР локомотивов имел бюджетный принцип организации: дирекция по ремонту ежегодно и ежеквартально защищала бюджет. Была заинтересованность в увеличении бюджета. Однако имело место необоснованное секвестрование затрат: для формального повышения производительности труда сокращался объем планового ТООР до 10 % в год. С переходом на сервисные ТООР меняется технико-экономический статус локомотиворемонтного комплекса [7].

Согласно договорам на сервисное обслуживание нет непосредственной оплаты выполненных ТООР: оплачивается полезный пробег локомотивов. Доход сервисных компаний определяется по установленным в договорах тарифам (отдельно для каждой серии и каждого полигона) полезного пробега локомотивов в процессе тяги поездов. В результате нет заинтересованности в искусственном завышении бюджета ТООР. Создаются предпосылки для научно-практического обоснования системы ТООР, системы материально-технического обеспечения, повышения надежности локомотивов, сокращения простоя на планово-предупредительном и неплановом ТООР. Одновременно появилась потребность в соблюдении режимов эксплуатации.

В мировой практике заключения договоров на сервисное обслуживание общепринято обговаривать требования к уровню сервиса SLA (Service Level Agreement). В договорах на сервисные ТООР локомотивов главным показателем SLA является коэффициент технической готовности (КТГ) (коэффициент готовности к эксплуатации, КГЭ). Эти коэффициенты с небольшими различиями рассчитываются как отношение полезного времени эксплуатации локомотива к общему [8].

В договорах сервисного обслуживания [2–4] для определенной серии каждого полигона установлен допустимый минимальный уровень КГЭ, который изначально соответствовал достигнутому уровню до начала сервисных ТООР. Для вновь выпускаемых локомотивов уровень КГЭ соответствует установленному в техниче-

ских условиях (ТУ) и обычно равен 0,95. При этом оговаривается минимальный среднесуточный пробег локомотива, что существенно влияет на себестоимость ТООР, а также защищает сервисные компании от «пересодержания» парка на текущий объем перевозок.

При снижении уровня КГЭ ниже установленного в договоре, на тариф (руб./км) вводится понижающий коэффициент как отношение фактического КГЭ к установленному, что приводит к появлению недополученной выручки у сервисной компании. Таким образом, установлен интегрированный показатель качества ТООР, который легко рассчитывается по достаточно прозрачной формуле и приводит к прямым потерям сервиса. При этом единственным неочевидным моментом остается порядок отнесения вины за неплановый ремонт (НР) с неплановым заходом локомотива в депо, что существенно влияет на уровень КГЭ. Это обстоятельство стало решающим для развития в сервисных компаниях систем мониторинга эксплуатации и технического состояния тягового подвижного состава [9, 10]. Следует еще раз отметить, что выручка сервисных компаний практически не зависит от них, так как полезный пробег локомотивов определяется объемом перевозок, числом пар поездов (кстати, не зависит и от массы поезда, что делает сервис «противником» тяжеловесного движения). Поэтому увеличение доходности сервисных компаний возможно путем исключения недополученной выручки и снижения себестоимости ТООР за счет научно-технического развития хозяйства, снижения времени простоя на плановых и неплановых ТООР, повышения производительности труда посредством внедрения новых технических средств, систем диагностирования, оптимального материально-технического снабжения, оптимизации структуры и периодичности ТООР [11–13].

В результате перехода на сервисные ТООР появилась объективная потребность перехода от экстенсивных методов управления к интенсивным с применением передовых методов хозяйствования.

Контракт жизненного цикла

Как было отмечено ранее, первые договоры сервисного обслуживания [2, 3] были со временем заменены на КЖЦ [4], что является мировым трендом при продаже сложной техни-

ки (Life Cycle Contract). В России есть Федеральный закон «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» от 5 апреля 2013 г. № 44-ФЗ, определяющий порядок заключения КЖЦ на срок свыше 20 лет.

КЖЦ локомотивов [4] ТМХ и СТМ имеют большую приемственность с первыми договорами [2, 3]. Остался неизменным принцип оплаты за полезный пробег магистральных локомотивов (за часы работы для маневровых), система SLA также осталась прежней, но ужесточились требования к качеству. Например, уровень КГЭ установлен согласно требованиям ТУ (0,95), а не как ранее – достигнутый в эксплуатации. Дополнительно замена выработавшего свой ресурс линейного оборудования включена в стоимость КЖЦ.

Работа локомотивостроительных компаний с ОАО «РЖД» по КЖЦ – принципиально новая форма работы, подобного опыта ни у кого не было. При очевидной перспективности требуется разработка научно обоснованных взаимовыгодных принципов формирования SLA, развития самой системы ТОиР [14–18].

Изначальные проблемы сервисного технического обслуживания и ремонта

Реформа локомотивного хозяйства столкнулась с рядом проблем этапа становления сервиса [19]. Первыми возникли проблемы с разделением территории депо, инфраструктура которых (отопление, водоснабжение, санузлы, зоны отдыха и др.) не была рассчитана на двух и более хозяйствующих субъектов. Разделение капитальных строений продолжается в основном за счет нового строительства помещений как для эксплуатации, так и для ТОиР. Таким образом, первая проблема переходного периода решается.

Вторая возникшая проблема – отсутствие юридического опыта работы согласно договорам, неумение взаимодействовать между собой двух юридических лиц по строго установленным в договорах правилам, включая SLA. Бесконечные совещания и внесение по ходу новых «правил игры» и сейчас имеют место, как и решение местных задач за счет сервисных компаний, «защита мундира», необоснованное отнесение ответственности за отказы на сервис. Формализация взаимоотношений заказчика и исполнителя еще продолжается.

Отдельной проблемой стало изначальное

восстановление технического состояния локомотивов до полностью работоспособного, восстановление комплектности локомотивов, реализация «второстепенных» функций, включая электрическое торможение (реостатное и рекуперативное), ослабление поля тяговых электродвигателей на высоких скоростях и др. В настоящее время этот переходный процесс в целом завершен.

Имел место существенный перепробег локомотивов, причем как по текущим ТОиР (ТО-2, ТО-3, ТР-1), так и по «тяжелым» видам ремонта (ТР-2, ТР-3). Перепробег существенно снижает надежность локомотива и недопустим при сервисной форме ТОиР с разнесением финансовой ответственности за повышение себестоимости ремонта, снижение КГЭ. Несмотря на решение этой проблемы, предпринимаются попытки без должного обоснования увеличить межремонтные пробеги, что особенно рискованно для старых серий.

Возникла проблема и с функциями машиниста. Было принято решение, что машинист при переходе на сервис не отвечает за исправность локомотива. Но отказ локомотива из-за неумения машинистом собрать аварийную схему и других элементарных ситуаций потребовало частично вернуть функции машиниста по восстановлению работоспособности локомотива. Найти компромисс в обязанностях машиниста ремонтировать локомотив еще предстоит. Тем более возникли проблемы при переводе машинистов пассажирских локомотивов в статус «операторов». Важную роль здесь должны сыграть системы поддержки принятия решений: телефонная связь со службой поддержки, online-системы на базе бортового компьютера.

Важная проблема – нарушения режимов эксплуатации локомотивов (НРЭ). С начала сервисного обслуживания было обращено внимание на использование диагностических данных бортовых микропроцессорных систем управления (МСУ), которыми оснащаются все современные локомотивы: МСУД и МПСУ производства АО «Локомотивные электронные системы» (ЛЭС) (г. Новочеркасск) на электровозах, МСУ-ТП и МСУ-ТЭ производства Всероссийского научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава (ВНИКТИ) (г. Коломна) на тепловозах. Имелись МСУ и на «старых» сериях локомотивов: системы автоведения УСАВП

производства ООО «АВП Технология», системы учета топлива АПК Борт производства Научно-исследовательского института технологий, контроля и диагностики железнодорожного транспорта (г. Омск) [13]. На модернизированных электровозах серии ВЛ80Р использовались данные МСУЭ производства Дорожного центра внедрения Красноярской железной дороги. Данные МСУ считывались с бортовых накопителей информации с помощью переносных flash-накопителей информации для дальнейшего ввода в компьютер. Для их расшифровки использовались программы изготовителей МСУ. По мере накопления опыта была заказана доработка программного обеспечения алгоритмами автоматического поиска НРЭ. Параллельно для организации ТОиР по техническому состоянию автоматизировался поиск предотказных состояний и отказов. Позже было разработано техническое задание на единую информационную систему, автоматизированное рабочее место, получившее название «Умный локомотив» (АРМ УЛ), являющееся основной системой расшифровки данных бортовых МСУ в «ЛокоТех».

Востребованность использования данных МСУ (изначально для поиска НРЭ) оказалась настолько значимой, что в сервисных локомотивных депо сверх установленного штата были созданы группы диагностики из трех человек, в задачи которых входило считывание данных с МСУ локомотивов при их заходе в депо, ввод в компьютер, расшифровка и учет результатов диагностирования. Для учета НРЭ была разработана Единая система мониторинга эксплуатации локомотивов (ЕСМТ), которая и сейчас является основной в «ЛокоТех» при работе с НРЭ.

Далее были выполнены научно-исследовательские работы по алгоритмической защите локомотивов от НРЭ через доработку программного обеспечения. Эксперименты были выполнены совместно с ЛЭС, ВНИКТИ, АВП «Технология» и ДЦВ Красноярской железной дороги. Доработка программного обеспечения – самый быстрый и дешевый способ защиты локомотивов от НРЭ. Эксперименты были выполнены на МСУЭ ВЛ80Р, МСУД ЭС5К, МСУ-ТЭ, ТЭП70БС и др. Результат оказался очень эффективным. На электровозах серии «Ермак» (2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К) удалось практически полностью исключить отказ типа «круговой огонь по коллатору» за счет защиты от возможного превы-

шения напряжения на тяговых электродвигателях свыше 1 000 В. Но алгоритмические защиты от НРЭ имели и обратную сторону: машинисты стали называть локомотив с защитами «ленивым». У заводов-изготовителей появился риск претензий со стороны заказчика по тяговым характеристикам локомотива, от некоторых правильных защит отказались по конъюнктурным соображениям. Интересен опыт эксплуатации тепловозов серии 2ТЭ116УД в депо Иваново с дизелями производства General Electric: их МСУ в принципе не позволяют нарушить режимы эксплуатации.

Мониторинг НРЭ по данным МСУ и с использованием ЕСМТ показал, что эксплуатация тяжеловесных поездов практически не обходится без нарушений: нарушение скоростного режима при тяге на руководящем подъеме, применение вспомогательного тормоза для борьбы с боксованием, длительная езда с пятиминутным током – эти и ряд других НРЭ были массовыми. Были и другие НРЭ: длительная работа дизеля на холостом ходу, отсутствие продувки воздушных магистралей, запуск дизель-генераторной установки без прокачки масла, что существенно снижало надежность. В результате совместно с сервисными компаниями и дирекцией тяги разработан классификатор НРЭ с указанием возможных последующих отказов [20], определен порядок расследования. Постепенно ситуация исправлялась, хотя проблемы остались. И сейчас тяжеловесные поезда на Восточном полигоне водятся с НРЭ.

В сервисных договорах [2–4] прописана обязанность сервиса соблюдать технологию ТОиР, но до передачи ТЧР в СЛД происходило уменьшение штата, сокращение материально-технического обеспечения, частичное исключение ремонтных работ, что снижало издержки, но ухудшало надежность. Передаваемый сервису объем ТОиР отличается от установленных в руководствах по эксплуатации и ремонту локомотивов. В результате в стоимость одного километра пробега локомотива не заложены все предусмотренные работы. Научно обоснованной системы ТОиР в настоящее время нет.

При заключении первых сервисных договоров [2, 3] из-за финансовой невозможности реализации «правильной» технологии ТОиР были рассчитаны текущая себестоимость ТОиР, уровень SLA, среднесуточный пробег и др. В результате определена стоимость договора. Это был компромиссный подход, но потом в себе-

стоимость новых локомотивов не попали «тяжелые» ремонты ТР-2 и ТР-3. Необходимо научное обоснование технологии ТОиР.

Возникли проблемы с системой учета надежности технических средств ОАО «РЖД» «КАС АНТ», в которой установлены категории отказов по степени отрицательного влияния на перевозочных процесс. Но одни и те же отказы и неисправности могут приводить к различным последствиям. Частичная потеря тяговых свойств локомотива (например, из-за отказа одного тягового электродвигателя, одного выпрямительно-инверторного преобразователя) может привести к остановке тяжеловесного поезда на руководящем подъеме, просто к задержке поезда, а может пройти незамеченной для перевозочного процесса. Последствия отказа (категория) не может быть спрогнозирована изготовителем оборудования и локомотива в целом без знания особенностей полигона эксплуатации. Надежность может быть описана в показателях, предусмотренных национальными стандартами серии ГОСТ 27.

Кроме описанной проблемы с категориями отказов системы «КАС АНТ» возникли и проблемы с большой субъективностью отнесения поездным диспетчером вины, в том числе и по задержкам поездов, следующих за отказавшим.

Основные достоинства сервисного технического обслуживания и ремонта

В Российской национальной философской школе уделяется большое внимание наличию диалектических пар, единству и борьбе противоположностей как основы развития. В настоящее время чаще говорят о конкурентной среде, наличии баланса интересов. Внедряемая система сервисного обслуживания как раз соответствует этим требованиям развития.

ОАО «РЖД» заинтересовано в максимальном объеме перевозок, достигаемых в том числе за счет интенсивной эксплуатации парка локомотивов, вождения тяжеловесных поездов с максимально возможной скоростью, минимальной потерей времени на ТОиР локомотивов. Сервисные компании со своей стороны не заинтересованы в тяжеловесных поездах, так как они создают риск недопустимой загрузки локомотива. Также со стороны сервиса предъявляются требования к развитию инфраструктуры депо (новые пути, оптимизация маршрутов, удлинение канав цехов до длины современных локомо-

тивов), обновлению станкового парка, которые находятся на балансе ОАО «РЖД».

Со стороны ОАО «РЖД» постоянно предпринимаются попытки увеличить межремонтные пробеги, что безусловно повышает эффективность эксплуатации локомотивов [15]. Все новые серии локомотивов имеют увеличенный межремонтный пробег. Но к решению этой задачи следует подходить крайне осторожно, учитывать требования к ТОиР производителей оборудования. К сожалению, научно обоснованный подход к решению этой задачи не всегда имеет место на практике. Наличие независимого сервиса способствует решению этой задачи, в том числе через создание автоматизированных систем мониторинга технического состояния локомотивов.

Современные локомотивы имеют МСУ, автоматически управляющую тяговым приводом согласно заданиям машиниста и информации с датчиков тока, напряжения, частоты вращения, скорости, давления, температуры и др. МСУ не только существенно повысили тяговые характеристики подвижного состава, но и создали предпосылки для реализации бортовой системы технического диагностирования. Поэтому сервис с момента появления сразу стал использовать данные МСУ для мониторинга технического состояния оборудования [8, 12, 13, 21]. Одновременно удалось создать объективную систему контроля режимов эксплуатации локомотивов. После достаточно продолжительного процесса накопления опыта диагностирования по данным МСУ в ОАО «РЖД» был утвержден Классификатор НРЭ с указанием возможных последующих отказов [20].

При сервисных ТОиР, согласно КЖЦ, непосредственным участником процесса становятся заводы-изготовители как локомотивов, так и отдельных видов оборудования. Раньше интерес НЭВЗ, БМЗ, КЗ, «Уральские локомотивы» ограничивался гарантийным периодом, теперь приходится отслеживать весь этап эксплуатации жизненного цикла, вносить изменения в конструкции, повышать качество производства. Исторически в Министерстве путей сообщения СССР компетенция ТОиР находилась в проектно-конструкторском бюро локомотивного хозяйства (ПКБ ЦТ). С появлением КЖЦ такая компетенция стала развиваться и на заводах, что очень важно для развития локомотивостроения в целом.

Системные проблемы сервисной формы технического обслуживания и ремонта

Переход на сервисное обслуживание при всей своей обоснованности и перспективности создал и системную проблему. Отказ от бюджетной системы оплаты ТОиР, переход на оплату за полезный пробег локомотивов, невозможность увеличить выручку более чем предусмотрено перевозочным процессом, привели к принципиальному желанию сервисных компаний увеличить свою прибыль за счет экономии затрат на ТОиР.

В 60-е гг. XX в. производство автомобилей в США стало не выдерживать конкуренции с автомобилями Японии. Были выполнены аналитические исследования, выявлены и устранены существенные недостатки системы менеджмента качества с использованием методов Toyota Production System, Lean Production, Total Quality Management. Стали активно внедряться статистические методы управления предприятием, предложенные Э. Демингом в его теории варибельности предприятий. Но главной проблемой была признана ориентация предпринимателей на получение прибыли, а не на выполнение миссии. Востребованность миссии и качество ее реализации, в конечном счете, оценивается все той же прибылью, но прибыль при этом вторична. Первыми это поняли предприниматели Японии, потом США и Европы. Отечественным сервисным компаниям еще предстоит это понять. Уход из ТОиР высококвалифицированных кадров, несоблюдение технологии ТОиР, потеря компетенций, старение парка оборудования – все это станет неизбежным, если сервисные компании не будут во главу угла ставить свою миссию – обеспечение надежности локомотивов.

Системной проблемой следует считать и отсутствие у сервиса собственных зданий и сооружений, станков и технологического оборудования, которые сейчас принадлежат ОАО «РЖД». Наличие контроля материальной базы локомотивного хозяйства, согласно законодательству РФ, одновременно, к сожалению, не способствует заинтересованности сервиса в развитии, во вложении средств в перспективное оборудование, ремонт и модернизацию производства, в строительство зданий и сооружений. Требуется существенного развития путевая инфраструктура депо, которая не отвечает современным требованиям поточного производства.

Сервис не может вкладываться в развитие депо, а у локомотивного хозяйства часто нет в этом заинтересованности.

В качестве системной проблемы следует отметить традиционную отечественную проблему бюрократии: любые решения рассматриваются крайне медленно и не квалифицированно. Прогресс в развитии сервиса крайне затруднен.

Предиктивные техническое обслуживание и ремонт локомотивов

Ранее уже было сказано, что данные бортовых МСУ с самого начала сервисного обслуживания стали использоваться для борьбы с НРЭ [22, 23]. Вторым этапом стало использование данных МСУ для планирования дополнительного объема ремонта при заходе локомотива в депо.

Для автоматизации управления СЛД в «ЛокоТех» была внедрена ERP-система на базе пакета программ 1С УПП (сейчас планируется переход на 1С ERP), в которой решались задачи информатизации работы бухгалтерии, экономистов, склада и других вспомогательных подразделений. Именно на базе этой системы в «ЛокоТех» в 2015–2019 гг. была создана уникальная автоматизированная система управления ТОиР АСУ «Сетевой график» (АСУ СГ), а позже и автоматизированная система управления надежностью локомотивов (АСУНТ).

АСУ СГ включает в себя два крупных модуля. Первый – «Диагностическая карта» – является аналогом бумажного журнала формы ТУ-28, в котором регистрируются все замечания по техническому состоянию локомотива. Первоначально это были только бортовой рукописный журнал формы ТУ-152 и результаты приемки локомотива на ремонт. Позже добавились замечания мастера, возникающие в процессе самого ТОиР. Но благодаря наличию диагностических данных бортовых МСУ и системы АРМ УЛ стало возможным в качестве главного источника информации сделать электронные данные о техническом состоянии локомотива. Для этого была создана автоматизированная (после подтверждения диагностом) передача замечаний по техническому состоянию из АРМ УЛ в диагностическую карту АСУ СГ. В настоящее время решается задача отказа от flash-накопителей и передачи данных МСУ в АРМ УЛ по радиоканалу с локомотива в режиме online.

Второй модуль АСУ СГ – это АРМ Мастера. Назначение нарядов слесарям на выполнение работ со сдельной системой оплаты труда, что принципиально важно для обеспечения достоверности данных в системе: слесарь, заинтересованный в получении зарплаты, отслеживает ввод с терминала всей информации о выполненной работе. Назначение цикловых планово-предупредительных работ происходит автоматизировано с использованием заранее подготовленных шаблонов работ: «ТР-1», «ТР-2» и др. А вот назначение дополнительных сверхцикловых работ возможно только по замечаниям, зафиксированным в диагностической карте. Получение материалов на складе возможно только по выписанным нарядам.

После отметки слесарем на терминале выполнения работы, мастер производит приемку работы и отмечает ее выполнение. В конце смены объем работы подтверждается руководством депо, после чего информация поступает в отдел труда и заработной платы (ОТиЗ), где происходит окончательная проверка. Начисление зарплаты происходит практически автоматически с использованием модуля ЗИУП 1С. Именно сквозная цепочка управления складом и зарплатой делает информацию АСУ СГ высоко достоверной.

Описанная технология организации АСУ ТОиР (АСУ СГ) позволила фактически перейти на ремонт с учетом реального технического состояния оборудования локомотивов, т. е. на предиктивный ремонт. Важно отметить, что при этом объем ремонта только увеличивается, так как нельзя отказаться от планово-предупредительных работ, предусмотренных в руководствах по эксплуатации и ремонту, а также в ТУ на оборудование. Затраты при этом возрастают. Эффект достигается при устранении неисправностей на этапе предотказного состояния за счет исключения более дорогостоящих отказов. Основной эффект сервисные компании получают от снижения недополученной выручки из-за низкого КГЭ.

Стоимость сверхцикловых работ (эксплуатация при наличии НРЭ, заводами-изготовителями и ремонтными заводами, а также за самим сервисом) возлагается на виновную сторону.

Создание АСУ ТОиР на уровне сервисных депо наряду с решением задачи повышения качества ТОиР позволило создать надстройку –

АСУНТ, функционирующую уже на уровне всего ТМХ. В АСУНТ регистрируются все отказы, приведшие к неплановому заходу локомотива в депо или появлению сверхцикловых работ. По каждому случаю производится первичное расследование с определением проблемы, к которой относится этот отказ. Проблема регистрируется отдельно: по мере накопления отнесенных к ней отказов принимается решение о старте устранения проблемы. Определяется коренная причина группы отказов, разрабатывается техническое решение для ее устранения, формируется дорожная карта с указанием сроков, затрат и источников финансирования. После утверждения дорожной карты запускается процесс устранения проблемы.

Заключение

Научно обоснованные подходы всегда имели место при развитии железнодорожного транспорта. Одно из перспективных направлений – цифровая трансформация, внедрение АСУ [24]. Инкапсуляция математических вероятностно-статистических методов в работу локомотивных депо стало уже классическим [22]. Однако надо продолжать технологическое развитие сервисных форм хозяйствования.

Необходимо совершенствовать систему ТОиР: развивать SLA, уточнять алгоритмы расчета показателей надежности, формализовывать разнесение ответственности за отказы. Нужно учитывать неготовность депо к современным формам ТОиР, приводящим к объективным потерям. Особого рассмотрения требует система материально-технического снабжения, в том числе с позиций теории очередей и массового обслуживания. Требуется сменить путевое хозяйство депо для реализации поточных технологий в удлиненных под размер современных локомотивов цехах. Сервисное обслуживание предоставляет локомотиворемонтному комплексу системные преимущества, но имеет и недостатки. Останутся объективные и субъективные противоречия между заказчиком ТОиР и его исполнителем.

Представляется целесообразным в качестве дальнейшего развития перейти от предоставления сервисных услуг ТОиР к предоставлению услуг тяги, когда у железных дорог есть возможность альтернативного выбора услуг тяги как минимум у двух компаний.

Компании, которые будут предоставлять услуги тяги, указывают условия, на которых

они работают (SLA). Это не только цена одного километра тяги, это длительность пробега без ТОиР, допустимая масса поезда, обязательства по надежности (риск отказа), гарантированная участковая скорость. Возможны и экологические показатели, например, степень искажения напряжения в контактной сети, уровень шума, радиопомехи и др.

При формировании состава компаний-оператором у нее должно быть преимущественное право выбора вида тяги, в том числе возможность использования собственных локомотивов.

При переходе на предоставление услуг тяги решается ряд проблем, формализуются взаимоотношения процесса управления пере-

возками и тяги.

При переходе на предоставление услуг тяги станут обоснованными весовые нормы. Локомотивное хозяйство будет в руках профессионалов с минимизацией числа чиновников. Но есть риск обеспечения безопасности движения поездов, безопасности транспортной системы страны в целом. Поэтому следует учесть опыт авиоперевозок, когда аэропорты, диспетчерская служба и сами самолеты принадлежат разным юридическим лицам, а требования безопасности полетов исполняются неукоснительно.

Таким образом, переход на сервисную форму ТОиР локомотивов следует считать правильным и имеющим перспективы дальнейшего развития.

Список литературы

1. Лакин И.И., Раздобаров А.В. Опыт сервисного обслуживания локомотивов: итоги первого десятилетия // Локомотив. 2022. № 11. С. 4–7.
2. Договор между ОАО «РЖД» и СТМ-Сервис (№ 284) на сервисное обслуживание локомотивов от 30.04.2014. М., 2014. 8 с.
3. Договор между ОАО «РЖД» и ТМХ-Сервис (№ 285) на сервисное обслуживание локомотивов от 30.04.2014. М., 2014. 7 с.
4. Договор на поставку локомотивов ОАО «РЖД» и ЗАО «Рослокомотив» с обязательством обеспечения их сервисного обслуживания в период жизненного цикла № 2833180 от 29.03.2018.
5. Apparatus and Method for Performance and Fault Analysis : US patent / E.H. Hedlund, N.E. Roddy, D.R. Gibson et al. Publication number WO/2001/031450 ; publication date : May 3, 2001. // WIPO IP Portal : site URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2001031450> (Accessed January 25, 2021).
6. Train Maintenance // The Railway Technical Website : site. URL: <http://www.railway-technical.com/trains/train-maintenance/> (Дата обращения: 25.01.2021).
7. Аболмасов А.А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания : дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 180 с.
8. Лакин И.И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 195 с.
9. Аболмасов А.А., Мельников В.А., Лакин И.И. Мониторинг и диагностирование технического состояния локомотивов. Berlin : LAP Lambert Academic Publishing AG & CO.KG, 2014. 136 с.
10. Лакин И.К. Разработка теории и программно-технических средств комплексной автоматизированной справочно-информационной и управляющей системы локомотивного депо : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1997. 377 с.
11. Семенов А.П., Лакин И.К. Исследование эффективности эксплуатации локомотивов // Известия Транссиба. 2018. № 4 (36). С. 41–53.
12. Бочаров В.М., Кузнецов С.М. Использование информации АПК «Борт» для изменения периодичности технического обслуживания (ТО-3) и текущего ремонта маневровых тепловозов // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : тр. всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Омск, 2011. С. 227–233.
13. 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.
14. Буйносов А.П., Панов К.В. Имитационное моделирование процесса технических обслуживаний и текущих ремонтов электровозов в сервисном локомотивном депо // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 12. С. 177–180.
15. Горский А.В., Воробьев А.А., Скребков А.В. Использование эксплуатационных показателей надежности для оптимизации межремонтных пробегов электровозов на полигоне Челябинск – Рыбное // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов : материалы первой междунар. науч.-практ. конф. М., 2014. С. 144–152.
16. Горский А.В., Воробьев А.А. Надежность электроподвижного состава. М. : Маршрут, 2005. 303 с.
17. Статистический анализ повреждений тягового подвижного состава на примере железных дорог Сибирского региона / А.И. Орленко, М.Н. Петров, О.А. Терегулов и др. Красноярск : КрИЖТ, 2014. 128 с.
18. Орленко А.И., Петров М.Н., Терегулов О.А. Комплексная диагностика тягового двигателя электровоза. Красноярск : Полицом, 2016. 218 с.
19. Головаш А.Н. Проблемы и решения сервисного обслуживания локомотивов // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов : тр. первой междунар. науч.-практ. конф. М., 2014. С. 141–143.
20. Порядок оценки качества эксплуатации и ремонта локомотивов, предполагающий взаимный контроль и повышение

прозрачности отнесения виновности за допущенные отказы : распоряжение № ЦТ-47/р от 01.03.2016. М. : ОАО РЖД, 2016.

21. Семченко В.В., Мальцев Е.А., Раздобаров А.В. Опыт внедрения системы мониторинга технического состояния и режимов работы электровозов // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава : труды Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Красноярск, 2020. С. 327–332.

22. Стрельников В.Т., Исаев И.П. Комплексное управление качеством технического обслуживания и ремонта электровозов. М. : Транспорт, 1980. 207 с.

23. Семченко В.В., Лакин И.К., Мальцев Е.А. Включение алгоритмических защит в программное обеспечение МСУ электровозов // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава : тр. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Красноярск, 2020. С. 318–326.

24. Петров А.П. Комплексная автоматизированная система управления железнодорожным транспортом (АСУЖТ). М. : Транспорт, 1977. 599 с.

References

1. Lakin I.I., Razdobarov A.V. Opyt servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov: itogi pervogo desyatiletia [Experience of locomotive maintenance: results of the first decade]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2022, no. 11, pp. 4–7.

2. Dogovor mezhdu ОАО «RZhD» i STM-Servis No 284 ot 30.04.2014 na servisnoe obsluzhivanie lokomotivov [Contracts of JSC «Russian Railways» with STM-Service No 284 dated April 30, 2014 for service of locomotives]. Moscow, 2014. 8 p.

3. Dogovor mezhdu ОАО «RZhD» i TMKh-Servis No 285 ot 30.04.2014 na servisnoe obsluzhivanie lokomotivov [Contracts of JSC «Russian Railways» with TMH-service No 285 dated April 30, 2014 for service of locomotives]. Moscow, 2014. 7 p.

4. Dogovor na postavku lokomotivov ОАО «RZhD» i ЗАО «Roslokomotiv» s obyazatel'stvom obespecheniya ikh servisnogo obsluzhivaniya v period zhiznennogo tsikla № 2833180 ot 29.03.2018. [Contract for the supply of locomotives by Russian Railways and Roslokomotiv with an obligation to provide service during the life cycle No 2833180 dated March 29, 2018].

5. Hedlund E.H., Roddy N.E., Gibson D.R., Bliley R.G., Pander J.E., Puri A., O'Camb T.E., Lovelace J.H., II, Loncher S., Piero M.J. US Patent WO/2001/031450, May 3, 2001. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2001031450> (Accessed January 25, 2021).

6. Train Maintenance // The Railway Technical Website. URL: <http://www.railway-technical.com/trains/train-maintenance/> (accessed January 25, 2021).

7. 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 thesis. Moscow: MIIT, 2017. 180 p.

8. Lakin I.I. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov po dannym bortovykh apparatno-programmnykh kompleksov [Monitoring of the technical state of locomotives according to on-board hardware-software complexes]. Ph.D.'s thesis. Moscow: MIIT, 2016. 195 p.

9. Abolmasov A.A., Mel'nikov V.A., Lakin I.I. Monitoring i diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov [Monitoring and diagnosing the technical state of locomotives]. Berlin: LAP Lambert Academic Publishing AG & CO.KG, 2014. 136 p.

10. Lakin I.K. Razrabotka teorii i programmno-tekhnicheskikh sredstv kompleksnoi avtomatizirovannoi spravochno-informatsionnoi i upravlyayushchei sistemy lokomotivnogo depo [Development of theory and software and hardware of a complex automated reference and control system of locomotive depot]. Doctor's thesis. Moscow: MIIT, 1997. 377 p.

11. Semenov A.P., Lakin I.K. Issledovanie effektivnosti ekspluatatsii lokomotivov [Research of locomotives operation effectiveness]. *Izveshiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2018, no. 4 (36), pp. 41–53.

12. Bocharov V.M., Kuznetsov S.M. Ispol'zovanie informatsii APK «Bort» dlya izmeneniya periodichnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya (TO-3) i tekushchego remonta manevrovyykh teplovozzov [Using of automated software package «Bort» information to change the frequency of maintenance (TO-3) and current repair of shunting locomotives]. *Trudy vs Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhduнародnym uchastiem «Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation «Technological support of repair and improving the dynamic quality of railway rolling stock»]. Omsk, 2011, pp. 227–233.

13. 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.

14. Buinosov A.P., Panov K.V. Imitatsionnoe modelirovanie protsessa tekhnicheskikh obsluzhivaniy i tekushchikh remontov elektrovozov v servisnom lokomotivnom depo [Simulation modeling of the process of technical maintenance and current repairs of electric locomotives in the service locomotive depot]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region], 2019, no. 12, pp. 177–180.

15. Gorskii A.V., Vorob'ev A.A., Skrebkov A.V. Ispol'zovanie ekspluatatsionnykh pokazatelei nadezhnosti dlya optimizatsii mezhremontnykh probegov elektrovozov na poligone Chelyabinsk – Rybnoe [Using operational reliability indicators to optimize inter-repair runs of electric locomotives on the Chelyabinsk – Rybnoe range]. *Materialy pervoi mezhduнародnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Perspektivy razvitiya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov»* [Proceedings of the first international scientific and practical conference «Prospects for the development of locomotive maintenance»]. Moscow, 2014, pp. 144–152.

16. Gorskii A.V., Vorob'ev A.A. Nadezhnost' elektropodvizhnogo sostava [Reliability of electric rolling stock]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 303 p.

17. Orlenko A.I., Petrov M.N., Teregulov O.A., Luk'yanov E.V. Statisticheskii analiz povrezhdenii tyagovogo podvizhnogo sostava na primere zheleznyykh dorog Sibirskogo regiona [Statistical Analysis of Traction Rolling Stock Damages on the Exam-

ple of Siberian Region Railways]. Krasnoyarsk: KRIZhT Publ., 2014. 128 p.

18. Orlenko A.I., Petrov M.N., Teregulov O.A. Kompleksnaya diagnostika tyagovogo dvigatelya elektrovoza [Complex diagnostics of electric locomotive traction engine]. Krasnoyarsk: Polykom Publ., 2016. 218 p.

19. Golovash A.N. Problemy i resheniya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov [Problems and solutions of locomotive service]. *Trudy pervoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Perspektivy razvitiya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov»* [Proceedings of the first international scientific-practical conference «Prospects of development of locomotive service»]. Moscow, 2014, pp. 141–143.

20. Rasporyazhenie no TsT 47/r ot 01.03.2016 «Poryadok otsenki kachestva ekspluatatsii i remonta lokomotivov, predpolagayushchii vzaimnyi kontrol' i povyshenie prozrachnosti otneseniya vinovnosti za dopushchennye otkazy» [Order No CT 47/r dated March 1, 2016 «Procedure for assessing the quality of locomotive operation and repair, involving mutual control and increased transparency in attributing blame for failures»].

21. Semchenko V.V., Maltsev E.A., Razdobarov A.V. Opyt vnedreniya sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov raboty elektrovozov [Monitoring system experience for the technical condition and operating modes of electric locomotives]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Ekspluatatsiya i obsluzhivanie elektronnoho i mikroprotsessornogo 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. 327–332.

22. Strel'nikov V.T., Isaev I.P. Kompleksnoe upravlenie kachestvom tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta elektrovozov [Comprehensive quality control of maintenance and repair of electric locomotives]. Moscow: Transport Publ., 1980. 207 p.

23. Semchenko V.V., Lakin I.K., Mal'tsev E.A. Vkluyuchenie algoritmicheskikh zashchit v programmnoe obespechenie MSU elektrovozov [Algorithmic protections inclusion in the software of the of electric locomotives]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Ekspluatatsiya i obsluzhivanie elektronnoho i mikroprotsessornogo 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. 318–326.

24. Petrov A.P. Kompleksnaya avtomatizirovannaya sistema upravleniya zheleznodorozhnym transportom (ASUZhT) [Complex automated system of railway transport control (ASRTC)]. Moscow: Transport Publ., 1977. 599 p.

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.

Семченко Виктор Васильевич, кандидат технических наук, генеральный директор АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», г. Красноярск; e-mail: office@dcv.ru.

Раздобаров Алексей Васильевич, старший преподаватель кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: eps@omgups.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.

Victor V. Semchenko, Ph.D. in Engineering Science, General Director of JSC «Road Center for the implementation of the Krasnoyarsk Railway», Krasnoyarsk; e-mail: office@dcv.ru.

Alexei V. Razdobarov, Assistant Professor of Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: eps@omgups.ru.

Автоматизация расчета толщины подбалластного защитного слоя

В.А. Подвербный✉, К.М. Титов, П.Н. Холодов, О.А. Гнездилова

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

✉vpodverbniy@mail.ru

Резюме

В статье рассмотрена проблема обеспечения стабильности подбалластной зоны железнодорожного пути, приведен обзор нормативных документов и научных работ по теме исследования, показана ее значимость для строительства и эксплуатации железнодорожных путей в России и за рубежом. Проанализирована методика определения толщины подбалластного защитного слоя по условию ограничения величины морозного пучения его основания и обеспечения необходимой прочности подстилающего слоя, изложенная в СП 32-104-98. Разработана программа RASCHET_PZS.xlsx, с помощью которой проведен тестовый расчет толщины подбалластного защитного слоя для насыпи проектируемой железнодорожной линии третьей категории, сооружаемой из глинистых грунтов. Выполнена аппроксимация графика зависимости толщины дренарующего слоя $H_{др} = f(f)$ для метеостанций Красноярск при сумме градусо-суток отрицательных температур наружного воздуха (Ω) $1\ 830^\circ\text{C} \cdot \text{сут.}$ и Иркутск при $2\ 364^\circ\text{C} \cdot \text{сут.}$, а также аппроксимация графика $\sigma = f(h)$ – суммарной кривой нормальных напряжений для четырехосных вагонов при перспективной нагрузке на ось $294\ \text{кН/ось}$ ($30\ \text{тс/ось}$). Разработаны блоки полуавтоматического и автоматического поиска координаты $h_{z(\text{проч})}$, м. В программе RASCHET_PZS.xlsx определена толщина защитного слоя для Красноярск $h_{z(\text{пуч})} = 0,91\ \text{м}$ и Иркутск $h_{z(\text{пуч})} = 1,65\ \text{м}$. Сделан вывод, что следует продолжить работу над программой и создать базу расчетов для различных метеостанций Сибирского региона. С целью проработки множества вариантов проектируемой линии на предварительном предпроектном этапе с учетом потребности в дренарующем грунте необходимо использовать автоматизацию расчетов толщины подбалластного защитного слоя. При этом показатель объема потребного дренарующего грунта по вариантам трассы с учетом удаленности от разведанных карьеров может стать одним из важных критериев при многокритериальной оптимизации множества альтернатив.

Ключевые слова

подбалластный защитный слой, прочность подстилающего слоя, автоматизация расчета толщины защитного слоя, железнодорожная линия третьей категории

Для цитирования

Автоматизация расчета толщины подбалластного защитного слоя / В.А. Подвербный, К.М. Титов, П.Н. Холодов, О.А. Гнездилова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 57–71. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).57-71.

Информация о статье

поступила в редакцию: 31.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 22.11.2022 г.; принята к публикации: 23.11.2022 г.

Automation of the sub-ballast protective layer thickness calculation

V.A. Podverbnyi✉, K.M. Titov, P.N. Kholodov, O.A. Gnezdilova

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉vpodverbniy@mail.ru

Abstract

The article considers the problem of ensuring the stability of the sub-regional zone of the railway track, provides an overview of regulatory documents and scientific papers on the research topic, shows the importance of the topic for the construction and operation of the railway track in Russia and abroad. The technique of determining the thickness of the sub-ballast protective layer is analyzed conditional of limiting the amount of frost heaving of its base and ensuring the necessary strength of the underlying layer, set out in SR 32-104-98. The RASCHET_PZS.xlsx program has been developed, with the help of which a test calculation of the thickness of the sub-ballast protective layer for the embankment of the projected railway line of third category, constructed from clay soils, was carried out. The approximation of the dependence graph of the drainage layer thickness $H_{dr} = f(f)$ for the weather stations of the city of Krasnoyarsk at $\Omega = 1830\ ^\circ\text{C} \cdot \text{day}$ and the city of Irkutsk at $\Omega = 2364\ ^\circ\text{C} \cdot \text{day}$ was performed as well as the approximation of the graph $\sigma = f(h)$ – the total curve of normal stresses for 4-axle wagons with a prospective load on the axis of $294\ \text{kN/axis}$ ($30\ \text{ts/axis}$). Blocks of semi-automatic and automatic search for coordinates $h_{z(\text{str})}$, m were worked out. In the RASCHET_PZS.xlsx program the thickness of the protective layer is determined for Irkutsk $h_{z(\text{frost heave})} = 1,65\ \text{m}$ and for Krasnoyarsk $h_{z(\text{frost heave})} = 0,91\ \text{m}$. It is concluded that work on the program should be continued and a calculation base should be created for various weather stations in the Siberian region. To study a variety of options for the projected line at the preliminary pre-design stage, taking into account the need for drainage soil, it is necessary to use automation of calculations of the ballast protective layer thickness. At the same time, the indicator of the volume of required drainage soil for the route options, taking

into account their distance from the explored quarries, can become one of the important criteria for multi-criteria optimization of a variety of alternatives.

Keywords

sub-ballast protective layer, strength of the underlying layer, automation of calculation of the thickness of the protective layer, railway line of the third category

For citation

Podverbnyi V.A., Titov K.M., Kholodov P.N., Gnezdilova O.A. Avtomatizatsiya rascheta tolshchiny podballastnogo zashchitnogo sloya [Automation of the sub-ballast protective layer thickness calculation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 57–71. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).57-71.

Article Info

Received: October 31, 2022; Revised: November 22, 2022; Accepted: November 23, 2022.

Введение

Недостаточная несущая способность грунтов, расположенных в подбалластной зоне верхнего строения железнодорожного пути, а также неравномерное морозное пучение этих грунтов приводят к развитию деформаций основной площадки земляного полотна, что, в свою очередь, вызывает не только увеличение затрат на содержание пути, но и сокращает продолжительность жизненного цикла верхнего строения железнодорожного пути [1].

Для скоростных и высокоскоростных линий проблема обеспечения стабильности подбалластной зоны имеет большое значение [2], так же как для линий, на которых после реконструкции предусматривается повышение осевых и погонных нагрузок для грузовых поездов [3].

Решением проблемы является устройство подбалластных защитных слоев, имеющих повышенные прочностные и деформационные свойства.

Нормативные документы

Основные требования по проектированию подбалластного защитного слоя изложены в сводах правил: СП 119.13330.2017 «Актуализированная редакция СНиП 32-01-95» (с изменением № 1 от 24 декабря 2019 г.) [4] и СП 32-104-98 «Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1 520 мм» [5].

В 2012 г. были разработаны и утверждены следующие документы:

– Инструкция по устройству подбалластных защитных слоев при реконструкции (модернизации) железнодорожного пути [6];

– Технические условия на смеси щебеночно-гравийно-песчаные для защитных

слоев подбалластного основания железных дорог [7];

– Временные технические условия на нормативы и методы определения модуля деформации подбалластного основания при реконструкции пути [8].

Не потеряли своей значимости и нормативные документы, разработанные ранее:

– Методические рекомендации по проектированию земляного полотна железных дорог на пучинистых грунтах в суровых климатических условиях [9];

– Ведомственные строительные нормы ВСН 61-89 – Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты [10];

– ЦПИ 24 – Технические указания по устранению пучин и просадок железнодорожного пути [11].

Обзор работ по теме исследования

Значительным вкладом в разрабатываемую проблему является работа [12], в которой обоснованы нормативы осадок рельса и подпального основания, которые могут быть получены по результатам непрерывных по протяжению нагрузочных испытаний мобильными диагностическими комплексами СПМ-18 и СМ-4. После чего нормативы используются для оценки состояния железнодорожного пути.

Важным вопросом является выбор наилучшего варианта технологического процесса по устройству подбалластного защитного слоя.

В работе [13] проведено многокритериальное технико-экономическое сравнение вариантов создания подбалластных защитных слоев с использованием объемной георешетки. Варианты отличались по способу ее укладки, по раз-

новидности машин, применяемых для выгрузки щебеночно-гравийно-песчаной смеси, а также машин, используемых для ее уплотнения.

Для выбора наилучшего варианта технологического процесса в зависимости от характеристики участка строительства или реконструкции, наличия путевых комплексов и поездной обстановки могут быть использованы методы принятия решений в многокритериальных недетерминированных задачах проектирования [14].

Как отмечается в [15, 16] применение объемной георешетки увеличивает значение модуля упругости армированного слоя в 1,8–5,0 раз в зависимости от конструкции защитного слоя, модуля упругости подстилающего слоя и модуля упругости заполняющего материала.

Новым направлением является применение метода холодной регенерации грунтов для усиления основной площадки земляного полотна. В работе [17] предложен график производства основных работ по замене рельсошпальной решетки и устройству защитного слоя из грунтобетона толщиной 20 см по технологии холодной регенерации грунта с использованием ресайклеров WR 2500 с одновременной подачей водоцементной суспензии из смесительной установки WM 400 с последующим уплотнением грунтобетонного слоя.

Задача исследования возможности и эффективности применения грунтобетона в конструкциях защитных слоев является весьма актуальной [18].

Стабилизация грунтов основной площадки земляного полотна специальными составами позволяет значительно повысить прочность грунтов на сжатие при снижении их способности к морозному пучению [19].

В работе [20] на основе обобщения опыта применения и устройства защитных подбалластных слоев и результатов проведенных натурных экспериментов определена эффективность использования геосинтетиков для повышения прочности грунтов в рабочей зоне основной площадки земляного полотна, а также исследована технология создания подбалластных защитных слоев с использованием путевой машины АНМ-800R.

Установлены преимущества использования такой технологии:

– возможность непрерывного формирования защитного слоя толщиной до 50 см без демонтажа рельсошпальной решетки;

– применение материала балластной призмы, измельченного, увлажненного и смешанного с гравийно-песчаной смесью;

– устройство разделительного и армирующего слоев за счет укладки геосинтетиков в темпе машины;

– сокращение времени закрытия перегона при обеспечении пропуска поездов по соседнему пути.

Предложенная технология в настоящее время может применяться не только с помощью машин австрийского производства АНМ-800R [21], могут использоваться и отечественные путевые машины ЩОМ-МР и МР-100 и путевые комплексы [22–24].

В ряде работ исследуется влияние на деформативность пути упругой прослойки подбалластных матов в конструкции подшпального основания [25], а также оцениваются результаты испытаний осадки основания штампа на щебеночном основании, стабилизированном георешеткой, по сравнению с нестабилизированным, с использованием численного моделирования напряженно-деформированного состояния [26].

Следует отметить ряд диссертационных исследований, посвященных рассматриваемой проблеме.

В диссертации [27] проведены наблюдения за влиянием защитных слоев на деформационные характеристики пути на опытной насыпи экспериментального кольца Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ). Сделаны выводы о необходимости дифференциации схем усиления подбалластного основания в зависимости от значений показателя деформативности рабочей зоны земляного полотна. Предложен критерий-ограничение стабильной работы пути в виде условного приведенного модуля деформации подбалластного основания не ниже 35 МПа.

В диссертации [28] по результатам полевых экспериментов на объектах Московской железной дороги и расчетов напряжений, действующих на основную площадку земляного полотна, с использованием метода конечных элементов, реализованного в программно-вычислительном комплексе «Katran», предложены конструктивно-технологические решения по повышению стабильности геометрии рель-

совой колеи на участках обращения поездов повышенного веса и длины.

В диссертации [29] разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния грунтов балластного слоя и земляного полотна, учитывающая распространение повышенных инерционных сил и снижение прочностных характеристик грунтов подпального основания при обращении подвижного состава с осевыми нагрузками до 300 кН, и предложены требования к материалу и конструкции балластного слоя железнодорожного пути.

За рубежом также проводят научные исследования в данной области.

В работе [30] по результатам полевого эксперимента, проведенного на земляном полотне железной дороги Пекин – Сюань, путем определения коэффициента уплотнения (contraction meter value, CMV) и модуля динамической деформации (dynamic deflection modulus, Evd) крупнозернистых грунтов земляного полотна была исследована пространственная однородность уплотнения. Предложенный анализ устойчивости и пространственной однородности грунтов может помочь подрядчику в выявлении плохо уплотненных участков или участков с сильно неоднородными условиями, которые нуждаются в дополнительном уплотнении или модификации грунтов.

В работе [31] проведено исследование на полномасштабных испытательных стендах двух типов балластного основания – со стабилизирующим материалом из цементно-асфальтового раствора (cement asphalt mortar, CAM) и без него. Установлено, что балластное основание в первом случае создает прочную мембрану между частицами балласта, которая обеспечивает сцепление и упрочняющий эффект для всего слоя балласта, тем самым усиливая структурную жесткость железнодорожного полотна. Сделан вывод, что предложенная технология позволит сократить общую стоимость жизненного цикла верхнего строения пути, особенно на интенсивно эксплуатируемых линиях высоких категорий.

В работе [32] проведено экспериментальное исследование по изучению влияния модификации диоксидом кремния и полипропиленовым волокном на прочность и поведение при замораживании-оттаивании стабилизированной известью каолиновой глины. Модифицированная диоксидом кремния и волокнами глина,

обогащенная известью, достигла максимальной прочности при 0,25 % добавленных волокон и 10 % диоксидов кремния. Результаты показали, что модифицированная каолиновая глина может быть экономичной и экологически чистой альтернативой в проектах по стабилизации грунтов земляного полотна.

В работе [33] проведено сравнение основных показателей, используемых для оценки степени уплотнения и механических характеристик геотехнической системы земляного полотна. В качестве контрольного показателя рекомендуется использовать коэффициент уплотнения, а показатели статистического модуля деформации Ev2 и динамического модуля деформации Evd использовать как контрольные для оценки качества железнодорожного земляного полотна.

В работе [34] приведены результаты испытания по виброзащите на различных глубинах земляного полотна до и после его усиления. Установлено, что виброускорение усиленного земляного полотна на глубине 4,5 м не превышает 60 % от виброускорения на его поверхности.

В работе [35] представлены итоги исследования участка земляного полотна железной дороги большой протяженности – Мэнхуа (Menghua). Получены закономерности динамических характеристик под воздействием поездной нагрузки грунтов земляного полотна, стабилизированных цементом и известью. Результаты исследования убедительно доказали, что при одинаковых условиях показатели критического динамического напряжения грунтов земляного полотна, стабилизированных цементом, в 1,2 раза лучше, чем у грунтов, стабилизированных известью.

Таким образом, можно утверждать, что проблема улучшения грунтов основной площадки земляного полотна и исследования различных конструкций подбалластных защитных слоев является значимой для строительства и эксплуатации железнодорожного пути в России и за рубежом.

На предпроектном этапе для предварительной оценки потребности в дренирующем грунте для создания подбалластных защитных слоев для земляного полотна, сооружаемого из недренирующих грунтов, предлагается использовать методику расчета подбалластного защитного слоя в соответствии с СП 32-104-98 [5].

Методика определения толщины подбалластного защитного слоя в соответствии со сводом правил СП 32-104-98

Толщину подбалластного защитного слоя определяют расчетами, исходя из двух условий: обеспечения требуемой прочности основной площадки и ограничения величины деформаций железнодорожного пути под воздействием морозного пучения грунтов земляного полотна.

Требуемая толщина защитного слоя из песчано-гравийных грунтов по условию ограничения величины морозного пучения его основания $h_{з(пуч)}$ определяется по формуле:

$$h_{з(пуч)} = n \cdot m \cdot H_{др} - h_6, \quad (1)$$

где n – коэффициент, учитывающий вид конструкции земляного полотна ($n = 1,0$ – для нулевых мест; $0,95$ – для выемок глубиной более $1,0$ м; $1,05$ – для насыпей высотой более $1,0$ м; m – коэффициент, учитывающий увеличение глубины промерзания земляного полотна по сравнению со средними данными; $H_{др}$ – суммарная толщина слоя дренирующих грунтов, рассчитываемая как $H_{др} = h_{з(пуч)} + h_6$, м; h_6 – толщина балластного слоя от верха балластной призмы до низа балластного слоя, м.

Коэффициент, учитывающий увеличение глубины промерзания земляного полотна по сравнению со средними данными определяется по формуле:

$$m = \sqrt{\frac{\Omega_{10}}{\Omega}}, \quad (2)$$

где Ω_{10} – максимальная в десятилетнем периоде сумма градусо-суток отрицательных температур наружного воздуха за год, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут.}$;

Ω – многолетняя средняя сумма градусо-суток отрицательных температур наружного воздуха, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут.}$

Значения Ω и Ω_{10} определяются по СП 131.13330.2020. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. Строительная климатология [36].

Для Красноярска $\Omega = 1\,830$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут.}$; $\Omega_{10} = 2\,050$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут.}$ Для Иркутска $\Omega = 2\,364$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут.}$; $\Omega_{10} = 2\,658$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут.}$

Тогда коэффициент m , рассчитанный для Красноярска по формуле (2) равен:

$$m = \sqrt{\frac{2050}{1830}} = 1,06.$$

Значения интенсивности пучения определяют по СП 32-104-98 [5].

При определении интенсивности пучения учитывают прогнозируемый режим поверхностных и грунтовых вод, устанавливающийся в результате строительства или реконструкции земляного полотна и противодеформационных мероприятий.

В тестовом примере расчет выполнен для третьей категории проектируемой линии, район проектирования – метеостанция г. Красноярск, насыпь сооружается из суглинков с расчетной интенсивностью пучения $f = 0,07$.

На рис. 1 приведен график толщины дренирующего слоя $H_{др} = f(f)$ при $\Omega = 1\,830$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут.}$, обеспечивающей не превышение допустимой величины пучения (для допустимой величины пучения $\Delta = 25$ мм).

На графике показано определение значения $H_{др}$ при $f = 0,07 = 7\%$ для грунтов насыпи, отсыпанной из суглинков, при $\Omega = 1\,830$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут.}$

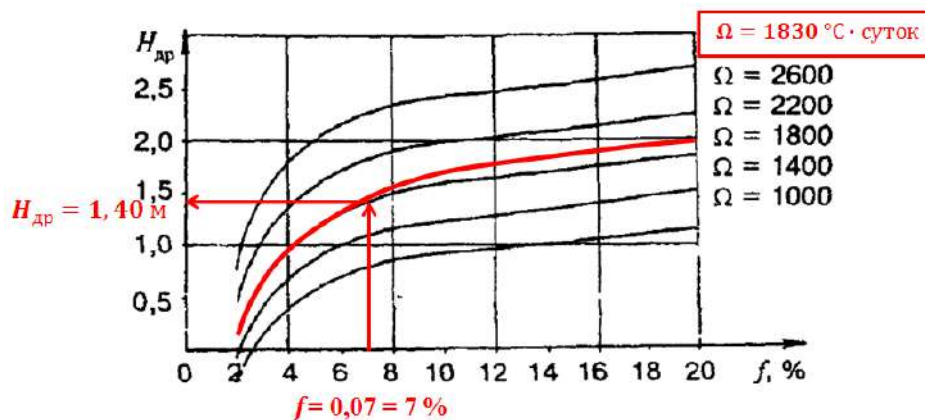


Рис. 1. График зависимости толщины дренирующего слоя $H_{др} = f(f)$ при $\Omega = 1\,830$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$

Fig. 1. Graph of the dependence of the drainage layer thickness $H_{dr} = f(f)$, at $\Omega = 1\,830$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$

Значение найдено графически $H_{др} = 1,40$ м.

Для третьей категории проектируемой линии и принятой конструкции верхнего строения пути – бесстыковой путь со скреплением ЖБР-65Ш на железобетонных шпалах ШЗД (толщина шпалы в средней части 0,20 м), толщина щебня под шпалой 0,40 м имеет значение $h_6 = 0,20 + 0,40 = 0,60$ м.

Расчет толщины подбалластного защитного слоя по первому условию выполним для насыпи высотой более 2 м.

По формуле (1) значение толщины защитного слоя по первому условию определится следующим образом:

$$h_{з(пуч)} = 1,05 \cdot 1,06 \cdot 1,40 - 0,60 = 1,56 - 0,60 = 0,96 \text{ м.}$$

Таким образом, по условию ограничения величины морозного пучения основания толщина защитного слоя должна быть не менее 0,96 м.

Вторым этапом необходимо выполнить расчет толщины подбалластного защитного слоя по условию обеспечения необходимой прочности подстилающего слоя.

В соответствии с СП 32-104-98 для предотвращения возможности возникновения в грунте деформаций, пластических сдвигов суммарные нормативные напряжения (σ , кПа) от поездной нагрузки, собственного веса грунта и веса верхнего строения пути не должны превышать критической для данного грунта нагрузки ($P_{кр}$, кПа), величина которой определяется по формуле:

$$P_{кр} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{C}{\text{tg } \varphi} + \gamma \cdot h \right)}{\text{ctg } \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma \cdot h, \quad (3)$$

где C – удельное сцепление грунта, кПа; φ – угол внутреннего трения грунта, радиан; γ – удельный вес грунта, кН/м³; h – расстояние от основной площадки до расчетного горизонта, м.

При расчете следует принимать минимально возможные прочностные характеристики грунтов, соответствующие условиям их весеннего оттаивания.

Величину $P_{кр}$ следует определить для двух значений глубины расчетного горизонта: 0 и 1 м.

Затем необходимо построить график прямой линии $P_{кр} = f(h)$ – график изменения критической нагрузки по глубине для данного вида грунта.

Эту прямую линию проводят через две точки: $P_{кр} = f(h = 0)$ и $P_{кр} = f(h = 1)$.

Построить прямую необходимо на поле графика изменения нормальных напряжений в грунте $\sigma = f(h)$.

Графики $\sigma = f(h)$ рассчитаны и построены по программе Центрального научно-исследовательского института связи для четырех- и восьмиосных вагонов при нагрузке на ось 30 кН и приведены в [5].

На рис. 2 представлен график $\sigma = f(h)$ для четырехосных вагонов при перспективной нагрузке на ось 294 кН/ось (30 тс/ось). Представленный график далее используется в расчете.

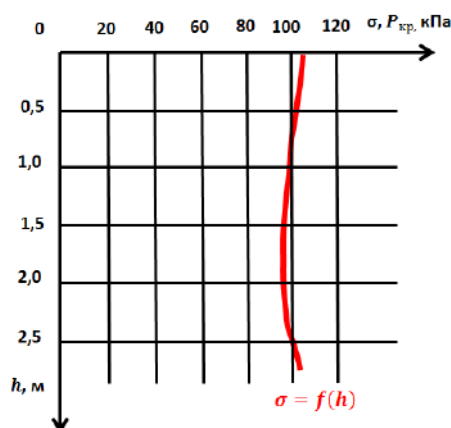


Рис. 2. График зависимости $\sigma = f(h)$ для четырехосных вагонов, принятый по СП 32-104-98
Fig. 2. Dependence graph $\sigma = f(h)$ for four-axle wagons, adopted according to the SR 32-104-98

В тестовом примере характеристики суглинистого грунта, из которого отсыпана насыпь приняты следующими:

– удельное сцепление грунта $C = 13,3$ кПа;

– угол внутреннего трения грунта $\varphi = 18^\circ = 0,314$ радиан;

– удельный вес грунта $\gamma = 19,4$ кН/м³.

Значения h – расстояние от основной площадки до рассматриваемого горизонта, принимались равными $h_0 = 0$ м, $h_1 = 1$ м.

По формуле (3) выполнен расчет:

$$P_{кр0} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{13,3}{\text{tg } 0,314} \right)}{\text{ctg } 0,314 + 0,314 - \frac{\pi}{2}} = 70,53 \text{ кПа};$$

$$P_{кр1} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{13,3}{\operatorname{tg} 0,314} + 19,4 \cdot 1 \right)}{\operatorname{ctg} 0,314 + 0,314 - \frac{\pi}{2}} + 19,4 \cdot 1 = 123,34 \text{ кПа.}$$

По точкам пересечения суммарной кривой нормальных напряжений $\sigma = f(h)$ и прямой $P_{кр} = f(h)$ была определена минимально допустимая по условиям прочности подстилающих грунтов толщина защитного слоя $h_{z(\text{проч})} = 0,65 \text{ м}$ (рис. 3).

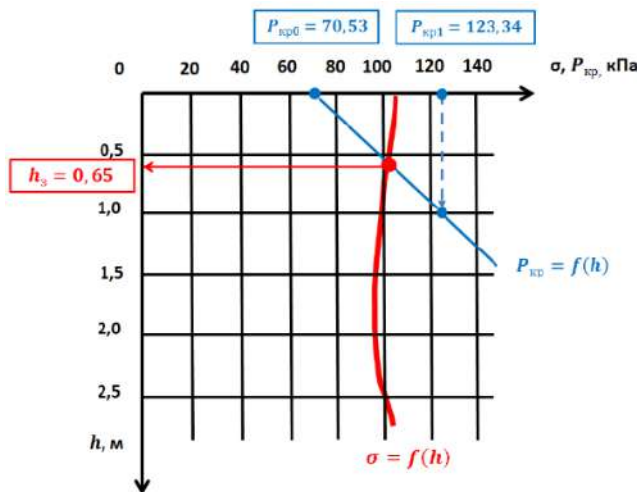


Рис. 3. Определение толщины защитного слоя $h_{z(\text{проч})} = 0,65 \text{ м}$ минимально допустимой по условиям прочности подстилающих грунтов

Fig. 3. Determination of the thickness of the protective layer $h_{z(\text{str})} = 0,65 \text{ м}$, the minimum conditionally allowable strength of the underlying soils

Следовательно, необходимо принять наибольшее из двух определенных значений толщины защитного слоя:

$$h_{z(\text{проект})} = \max \begin{cases} h_{z(\text{пуч})} = 0,96 \text{ м} \\ h_{z(\text{проч})} = 0,65 \text{ м} \end{cases} = 0,96 \text{ м.}$$

Таким образом, принимается проектное значение толщины подбалластного защитного слоя $h_{z(\text{проект})} = 0,96 \text{ м}$.

Автоматизация расчета толщины подбалластного защитного слоя

Для повышения эффективности и точности расчетов толщины подбалластного защитного слоя по методике, изложенной в СП 32-104-98, была разработана программа RASCHET_PZS.xlsx.

При автоматизации были поставлены и решены три задачи:

1. Выполнена аппроксимация графика зависимости толщины дренирующего слоя $H_{др} = f(f)$ при $\Omega = 1\ 830 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{сут.}$ для метеостанции в Красноярске и при $\Omega = 2\ 364 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{сут.}$ для метеостанции в Иркутске.

2. Выполнена аппроксимация графика $\sigma = f(h)$ – суммарной кривой нормальных напряжений для четырехосных вагонов при перспективной нагрузке на ось 294 кН/ось (30 тс/ось).

3. Разработана программа RASCHET_PZS.xlsx для расчета толщины подбалластного защитного слоя по методике, изложенной в СП 32-104-98, с полуавтоматическим и автоматическим поиском координаты $h_{z(\text{проч})}$, М.

Рассмотрим решение перечисленных задач, иллюстрируя их скриншотами из программы RASCHET_PZS.xlsx.

Аппроксимация графика зависимости толщины дренирующего слоя выполнена для метеостанций, расположенных в Красноярске и Иркутске.

Значение Ω – многолетней средней суммы градусо-суток отрицательных температур наружного воздуха определено по СП 131.13330.2020 [36].

Аппроксимация выполнена полиномом шестой степени по десяти точкам, определенным по графику зависимости толщины дренирующего слоя $H_{др} = f(f)$, обеспечивающей непревышение допустимой величины пучения, равной $\Delta = 25 \text{ мм}$ для третьей категории проектируемой железной дороги.

Результаты аппроксимации размещены рядом с графиком и формулой аппроксимации (рис. 4).

Ниже приведены обе формулы $H_{др} = f(f)$:

1. Формула по Иркутску (ряд 1):

$$y = -8\text{E-}07 \cdot 6 + 6\text{E-}05 \cdot 5 - 0,002 \cdot 4 + 0,0344 \cdot 3 - 0,3273 \cdot 2 + 1,7145 \cdot (-1,7637)$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 1$.

2. Формула по Красноярску (ряд 2):

$$y = -3\text{E-}07 \cdot 6 + 2\text{E-}05 \cdot 5 - 0,0007 \cdot 4 + 0,0113 \cdot 3 - 0,1151 \cdot 2 + 0,7441 \cdot (-0,7087)$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 1$.

Аппроксимация облегчает поиск значения $h_{z(\text{пуч})}$, так как вместо его определения вручную по графику $H_{др} = f(f)$ стало возможным автоматизировать расчет $H_{др}$ и других параметров.

Аппроксимация графика $\sigma = f(h)$ – сум-

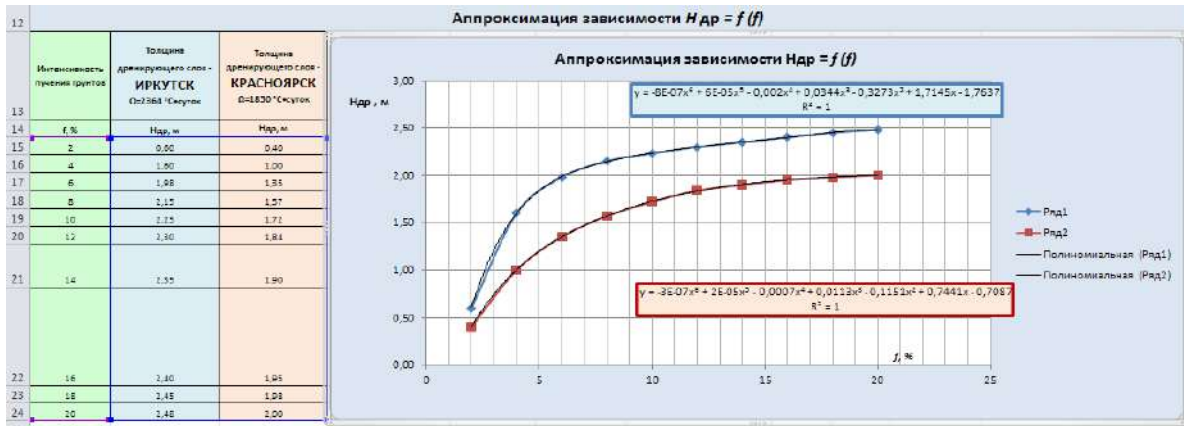


Рис. 4. Блок аппроксимации зависимости $H_{др} = f(f)$
 Fig. 4. The approximation block of the dependence $H_{др} = f(f)$

марной кривой нормальных напряжений для четырехосных вагонов при перспективной нагрузке на ось 294 кН/ось (30 т/ось) выполнена в отдельном блоке программы (рис. 5).

В результате аппроксимации была получена функция:

$$\sigma = -0,5466 \cdot h^6 + 3,6868 \cdot h^5 - 8,8585 \cdot h^4 + 11,4 \cdot h^3 - 10,056 \cdot h^2 - 0,135 \cdot h + 104,5$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,9999$.

Аппроксимация функции $\sigma = f(h)$ потребовалась для того, чтобы в программе можно было решить третью задачу – разработать блоки полуавтоматического и автоматического поиска координаты $h_{з(проч)}$, м.

Координата точки $h_{з(проч)}$, равная минимально допустимой по условиям прочности подстилающих грунтов толщины защитного слоя, определяется как точка пересечения суммарной кривой нормальных напряжений $\sigma = f(h)$ и прямой $P_{кр} = f(h)$.

Эту координату в СП 32-104-98

рекомендуется определять вручную.

В программе RASCHET_PZS.xlsx предлагаются два варианта расчета: полуавтоматический и автоматический (рис. 6).

Координата точки $h_{з(проч)}$ определяется как точка пересечения функции

$$P_{кр} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{C}{\text{tg } \varphi} + \gamma \cdot h \right)}{\text{ctg } \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma \cdot h$$

и функции

$$\sigma = -0,5466 \cdot h^6 + 3,6868 \cdot h^5 - 8,8585 \cdot h^4 + 11,4 \cdot h^3 - 10,056 \cdot h^2 - 0,135 \cdot h + 104,5.$$

Для того чтобы решить поставленную задачу в MSExcel необходимо найти точку пересечения графиков. Далеко не всегда они будут пересекаться непосредственно на поле диаграммы. Но пользователю нужно показать те значения, в которых линии рассматриваемых явлений пересекаются.

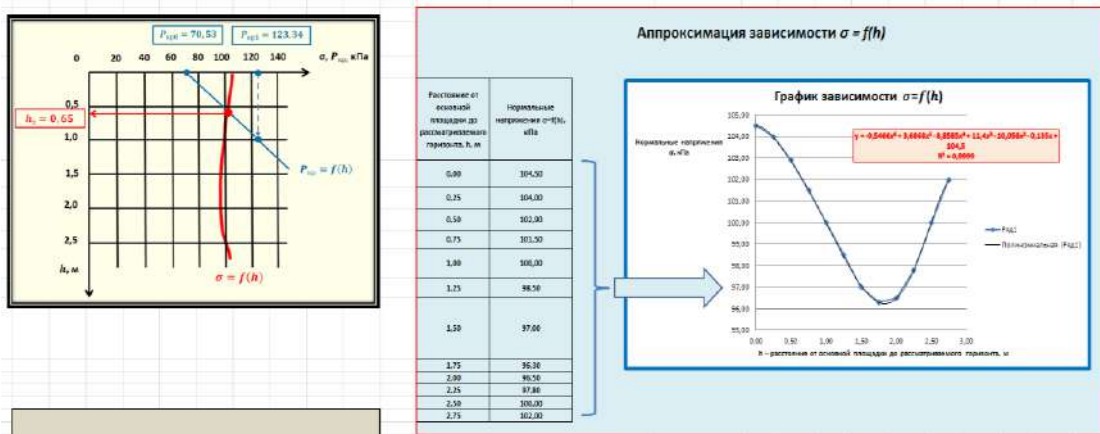


Рис. 5. Блок аппроксимации зависимости $\sigma = f(h)$
 Fig. 5. The approximation block of the dependence $\sigma = f(h)$

Полуавтоматический способ

Находим общую точку в рядах данных для указанных функций.

Сначала строим графики функций так, чтобы диапазон изменения абсциссы h был

небольшим, например, через 0,1 м.

Затем на графике визуально определяем точку пересечений и по таблице находим значение так, как показано на рис. 7.

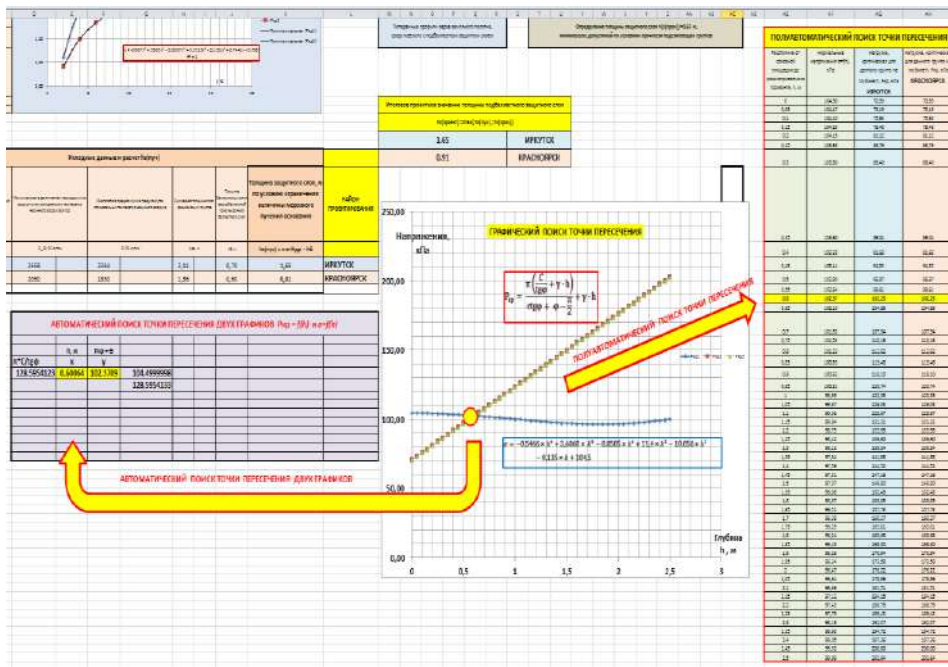


Рис. 6. Блоки полуавтоматического и автоматического поиска координаты $h_{z(проч)}$
 Fig. 6. Blocks of semi-automatic and automatic search for coordinates $h_{z(str)}$

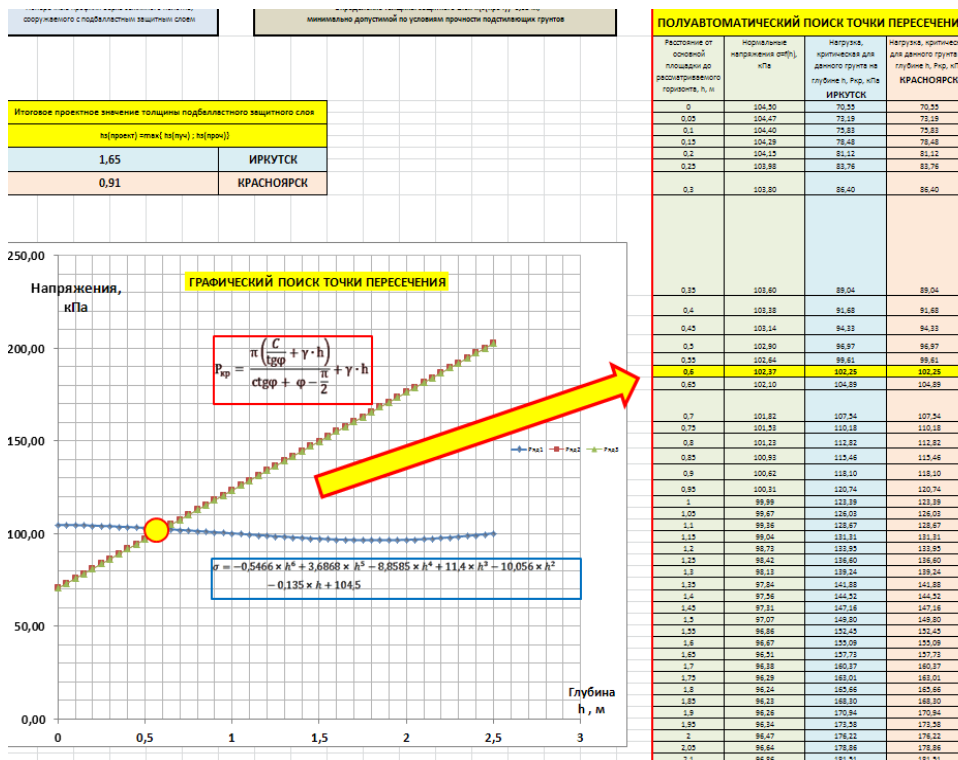


Рис. 7. Блок полуавтоматического поиска координаты $h_{z(проч)}$
 Fig. 7. Semi-automatic coordinate search block $h_{z(str)}$

Автоматический способ

Используем для решения уравнений специальный инструмент «Поиск решения». Кнопка вызова инструмента находится на вкладке «Данные». Если нет, то ее добавляют из надстроек Excel.

Преобразуем уравнения таким образом, чтобы неизвестные были в одной части. Далее для неизвестных x и y назначим ячейки в Excel.

Перепишем уравнения, используя ссылки на эти ячейки.

Вызываем меню «Поиск решения» и заполняем условия, необходимые для решения уравнений так, как это показано на рис. 8.

Нажимаем «Выполнить», и инструмент предлагает решение уравнений и дает необходимые пояснения (рис. 9).

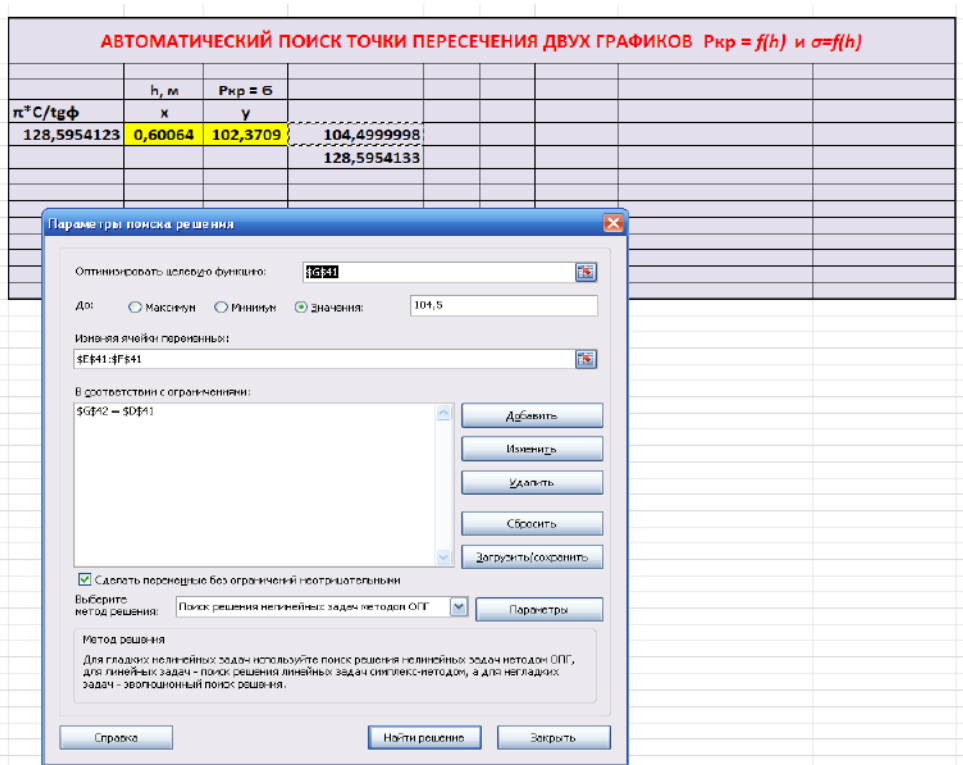


Рис. 8. Заполнение условий поиска решения
Fig. 8. Filling in of the conditions for a solution search

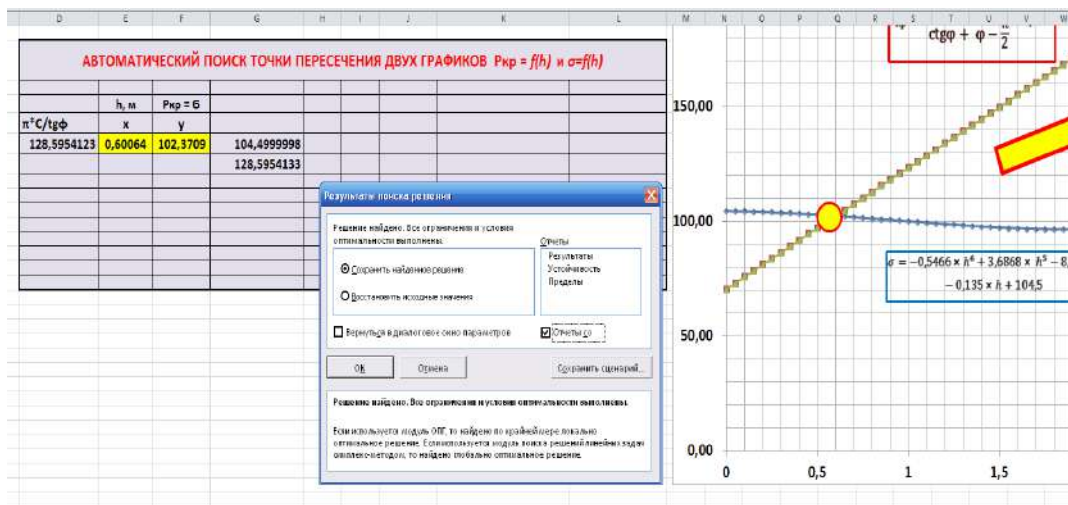


Рис. 9. Результат работы поиска решения
Fig. 9. The result of the search for a solution

Установленные значения для x и y совпадают с предыдущим решением, найденным с помощью составления рядов данных.

Сравним результаты ручного расчета, приведенного ранее:

$$h_{z(\text{проект})} = \max \begin{cases} h_{z(\text{пуч})} = 0,96 \text{ м} \\ h_{z(\text{проч})} = 0,65 \text{ м} \end{cases} = 0,96 \text{ м}$$

и результаты полуавтоматического и автоматического расчетов по программе –

$$h_{z(\text{проект})} = \max \begin{cases} h_{z(\text{пуч})} = 0,91 \text{ м} \\ h_{z(\text{проч})} = 0,60 \text{ м} \end{cases} = 0,91 \text{ м.}$$

Причиной расхождения является то, что значения вручную графически определяются неточно. Следует использовать результаты по программе и принять значение толщины защитного слоя для Иркутска $h_{z(\text{пуч})} = 1,65$ м, для Красноярска $h_{z(\text{пуч})} = 0,91$ м (рис. 10).

Итоговое проектное значение толщины подбалластного защитного слоя	
$h_{z(\text{проект})} = \max\{h_{z(\text{пуч})}; h_{z(\text{проч})}\}$	
1,65	ИРКУТСК
0,91	КРАСНОЯРСК

Рис. 10. Результаты расчетов $h_{z(\text{проект})}$

Fig. 10. Calculation results $h_{z(\text{project})}$

Следует также отметить, что толщина подбалластного защитного слоя в Иркутске должна быть больше $h_{z(\text{пуч})} = 1,65$ м по сравнению с такой же насыпью, сооружаемой из одинаковых глинистых грунтов, в Красноярске $h_{z(\text{пуч})} = 0,91$ м.

Причиной является значительное отличие в значениях Ω : для Иркутска $2\ 364$ °С · сут., для Красноярска – $1\ 830$ °С · сут.

В программе специально предусмотрены оба региона, чтобы можно было выполнять сравнения.

Проблемы при проектировании и внедрении конструкции подбалластного защитного слоя при реконструкции

По опыту работы авторов статьи над объектами реконструкции на БАМе (например, при проектировании двухпутной вставки на перегоне Заячий – Ларба) были установлены некоторые проблемы по внедрению конструкции подбалластного защитного слоя, которые приведены далее.

Ширина и глубина вырезки требуют

разборки части балластной призмы и верха земляного полотна под соседним эксплуатируемым путем, по которому осуществляется движение поездов, что приводит к дополнительным затратам, связанным с перерывами в движении поездов и последующим восстановлением положения действующего пути. Другим вариантом проектного решения является увеличение ширины земляного полотна по верху (вверху) не менее чем на 1,5 м, что нередко приводит к значительным строительным затратам, так как на большой протяженности участков реконструкции требуется разработка скальных грунтов на прижимах рек, либо отсыпка скальным грунтом в русло реки.

Путевые машинные комплексы по формированию подбалластного защитного слоя при реконструкции железнодорожного пути (отечественные и зарубежного производства) на железных дорогах Российской Федерации распространены пока еще не в достаточном количестве, по этой причине варианты проектных решений с глубокой вырезкой и устройством защитного слоя на глубине более 0,7 м с уплотнением без снятия рельсо-шпальной решетки нередко отвергаются заказчиком в проектах, несмотря на то, что их применение позволило бы реализовать передовую инновационную технологию.

Заключение

Проектирование строительства и реконструкции железных дорог выполняется вариантно.

При анализе используются технико-экономические показатели, одним из которых является потребность в дренирующих грунтах.

Автоматизация расчетов толщины подбалластного защитного слоя позволит проектировщикам определять объемы дренирующих грунтов по вариантам.

Показатель объема потребного дренирующего грунта и стоимости его доставки к участку строительства или реконструкции железной дороги в зависимости от удаленности разведанных карьеров в отдельных случаях является определяющим критерием при многокритериальной оптимизации множества альтернатив [37, 38] и при расчете показателей организационно-технологической надежности их строительства [39].

Список литературы

1. Ковенькин Д.А., Подвербный В.А. Этапы жизненного цикла верхнего строения железнодорожного пути // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2015. № 3. С. 151–156.
2. Подвербный В.А., Казарина В.В., Подвербная О.В. Проектирование скоростного пассажирского рельсового транспорта иркутской агломерации // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2016. № 4. С. 308–326.
3. Проектирование трассы железной дороги на участке ВСЖД Гончарово – Слюдянка в программном комплексе INVEST / Е.О. Попова, О.Ю. Попов, В.А. Бучкин и др. // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог : тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2009. Т. 1. С. 41–46.
4. СП 119.13330.2017 Железные дороги колеи 1520 мм (с изменением № 1 от 24.12.2019) : утв. приказом Минстроя РФ № 1648/пр от 12.12.2017 г. Введ. : 2018–06–13. М. : Минстрой России, 2017. 41 с.
5. СП 32-104-98 Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм : Одобрен Письмом Минземстроя РФ № 13-498 от 8.09.1998 г. Введ. : 1999–01–01. М. : Госстрой России, 1999. 160 с.
6. Об утверждении инструкции по устройству подбалластных защитных слоев при реконструкции (модернизации) железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» № 2544р от 12.12.2012. М. : ОАО «РЖД», 2012. 47 с.
7. Об утверждении и введении в действие технических условий на щебеночно-гравийно-песчаную смесь : распоряжение ОАО «РЖД» от 20.12.2012 г. № 2640р. М. : ОАО «РЖД», 2012. 15 с.
8. Временные технические условия на нормативы и методы определения модуля деформации подбалластного основания при реконструкции пути : утв. Департаментом пути и сооружений ОАО «РЖД» 30.11.2009. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
9. Методические рекомендации по проектированию земляного полотна железных дорог на пучинистых грунтах в суровых климатических условиях. М. : ЦНИИС, 1986. 49 с.
10. Ведомственные строительные нормы ВСН 61-89 Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты. М. : ЦНИИС, 1990. 189 с.
11. ЦПИ 24 Технические указания по устранению пучин и просадок железнодорожного пути. М. : Транспорт, 1998. 74 с.
12. Ашпиз Е.С., А.В. Замуховский. Обоснование нормативов деформативности подрельсового и подшпального оснований // Мир транспорта. 2012. № 5. С. 112–119.
13. Котова И.А., Чижов А.В., Юдин О.Г. Техничко-экономическое сравнение технологических вариантов устройства подбалластных защитных слоев с использованием объемной георешетки // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2017. № 1 (40). С. 36–45.
14. Казарина В.В., Подвербный В.А. Принятие решения по выбору варианта трассы железнодорожной линии // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 3 (82). С. 140–151.
15. Временные технические условия для опытного применения объемных георешеток Неовей при устройстве защитного подбалластного слоя. М. : ОАО «РЖД», 2009. 11 с.
16. Инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры (материалы, конструкции, технологии) : материалы науч.-практ. конф. / под ред. М. П. Клековкиной и др. СПб., 2019. 149 с.
17. Косенко С.А., Котова И.А., Акимов С.С. Техничко-экономическое обоснование устройства защитных подбалластных слоев из грунтобетона при тяжеловесном движении поездов // Вестн. Томск. гос. архитектур.-строит. ун-та. 2021. Т. 23. № 1. С. 161–174.
18. Акимов С.С., Косенко С.А. Ресайклинг как альтернативный способ повышения прочности подбалластного основания железнодорожного пути // Наука, образование, кадры : материалы нац. конф. в рамках IX Междунар. Сиб. трансп. форума. Новосибирск, 2019. С. 204–212.
19. Полевиченко, А.Г., Жданова С.М. Противодеформационные конструкции для стабилизации земляного полотна. Хабаровск : ДВГУПС, 2005. 82 с.
20. Анализ способов повышения несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна / Л.С. Блажко, С.Н. Чуян, В.Б. Захаров и др. // Известия ПГУПС. 2016. № 3. С. 328–336.
21. Путьевая машина АНМ 800R // auto-instructors.ru : сайт. URL: <https://auto-instructors.ru/articles/putevaya-mashina-ahm-800r> (Дата обращения: 16.05.2022).
22. Машины для укладки ПЗС // Группа ПТК АО «Тулажелдормаш» : сайт. URL: <https://www.tulazdm.ru/mr-100> (Дата обращения 16.05.2022).
23. ООО «ИнфраТех» - передовые решения при строительстве и ремонте // Евразия Вести : сайт. URL: <http://eav.ru/pub11.php?publid=2010-08a19> (Дата обращения: 16.05.2022).
24. Применение комплекса по формированию защитного подбалластного слоя (ЩОМ-2000, МР-100) при реконструкции (модернизации) железнодорожного пути на сети железных дорог Российской Федерации : технология ОАО «РЖД» от 06.07.2016 № 447. М. : ОАО «РЖД», 2016. 48 с.
25. Дудкин Е.П., Петряев А.В. Влияние подбалластных матов на величину упругих деформаций пути // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 7. С. 16–18.
26. Петряев А.В., Парамонов В.Н. Расчетный анализ поведения подшпального основания при его стабилизации геосинтетическими материалами // Транспорт Урала. 2022. № 1 (72). С. 62–67.
27. Третьяков В.В. Влияние характеристик подбалластного основания на интенсивность накопления расстройств пути в вертикальной плоскости : дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 163 с.
28. Акашов А.Н. Конструктивно-технологические и организационные решения по повышению стабильности геометрии рельсовой колеи на участках обращения поездов повышенного веса и длины : дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2010. 134 с.

29. Морозова А.А. Несущая способность подшпального основания железнодорожного пути на участках обращения поездов с осевыми нагрузками до 300 кН : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2014. 184 с.
30. Experimental study on the compaction characteristics and evaluation method of coarse-grained materials for subgrade / S. Li, Y. Ye; L. Tang et al. // *Materials* 2021. 14 (22). 6972. DOI 10.3390/ma14226972.
31. Le T.H.M., Lee S.-H., Park D.-W. Evaluation on full-scale testbed performance of cement asphalt mortar for ballasted track stabilization // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 254. P. 119249.
32. Saygili A., Dayan M. Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. Vol. 161. Pp. 107–114.
33. Comparison and evaluation of railway subgrade quality detection methods / R. Nie, W. Leng, Q. Yang et al. // *Journal of Rail and Rapid Transit*. 2016. Vol. 232. №. 2. Pp. 356–368.
34. Vibration response characteristics and application of existing railway subgrade / Zh. Junyun, H. Zhuoling, Ch. Siyuan et al. // *Hindawi // Shock and vibration*. 2021. Vol. 5/28. 10 p. DOI 10.1155/2021/9926980.
35. Experimental study on the dynamic features of cement-stabilized expansive soil as subgrade filling of heavy haul railway / Y. Shang, L. Xu, Y. Zhao et al. // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2017. Vol. 10. № 6. P. 136.
36. СП 131.13330.2020 Строительная климатология : утв. приказом Минстроя РФ № 859/пр от 24.12.2020. Введ. : 2021–06–25. М. : Минстрой России, 2020. 146 с.
37. Многокритериальная оптимизация множества вариантов железной дороги методом идеальной точки / А.В. Гавриленков, Ю.А. Быков, В.А. Подвербный и др. // *Транспортное строительство*. 1992. № 6. С. 10–11.
38. Подвербный В.А., Ковенькин Д.А., Филатов Е.В. Проектные решения по ликвидации большого места земляного полотна в проекте модернизации железнодорожного пути // *Наука и образование транспорту*. 2016. № 2. С. 181–185.
39. Симонова О.А., Гнездилова О.А. Оценка надежности календарного графика строительства моста // *Молодая наука Сибири*. 2021. № 1 (11). С. 272–276.

References

1. Koven'kin, D.A., Podverbnyi V.A. Etapy zhiznennogo tsikla verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti [Stages of the life cycle of the upper structure of the railway track]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog* [Designing the development of the regional railway network], 2015, no. 3, pp. 151–156.
2. Podverbnyi V.A., Kazarina V.V., Podverbnyaya O.V. Proektirovanie skorostnogo passazhirskogo rel'sovogo transporta irkutskoi aglomeratsii [Designing high-speed passenger rail transport of the Irkutsk agglomeration]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog* [Designing the development of the regional railway network], 2016, no. 4, pp. 308–326.
3. Popova E.O., Popov O.Y., Buchkin V.A., Podverbnyi V.A., Podverbnyaya O.V. Proektirovanie trassy zheleznoi dorogi na uchastke VSZHD Goncharovo – Slyudyanka v programmnom komplekse INVEST [Designing the railway route on the Goncharovo – Slyudyanka section of the East-Siberian Railway in the INVEST software package]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Problemy i perspektivy izyskaniy, proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznykh dorog»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Problems and prospects of research, design, construction and operation of railways»]. Irkutsk, 2009, vol. 1, pp. 41–46.
4. SP 119.13330.2017 Zheleznye dorogi kolei 1520 mm. (s izmeneniyem no 1 ot 24.12.2019) [Set of Rules no 119.13330.2017 Railway with 1520 mm track (with edit no 1 dated December 24, 2019)]. Moscow: Minstroy Publ., 2017. 41 p.
5. SP 32-104-98 Proektirovanie zemlyanogo polotna zheleznykh dorog kolei 1520 mm [Set of rules no 32-104-98 Design of earthwork for rail ways with 1520 mm track]. Moscow: Gosstroy Rossii Publ., 1999. 160 p.
6. Rasporyazhenie OAO «RZHD» no 2544r ot 12.12.2012 «Ob utverzhdenii instruksii po ustroystvu podballastnykh zashchitnykh sloev pri rekonstruktsii (modernizatsii) zheleznodorozhnogo puti» [Order of JSC «Russian Railways» no 2544r dated December 12, 2012 «About approval Instructions for the installation of sub-ballast protective layers during the reconstruction (modernization) of the railway track»]. Moscow: RZHD, 2012. 47 p.
7. Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 20.12.2012 no 2640r «Ob utverzhdenii i vvedenii v deystvie tekhnicheskikh uslovii na shchebenochno-graviino-peschanuyu smes' [Order of JSC «Russian Railways» dated December 20, 2012 no 2640r «On approval and introduction of technical conditions for crushed stone-gravel-sand mixture»]. Moscow: RZHD Publ., 2012. 15 p.
8. Vremennyye tekhnicheskyye usloviya na normativy i metody opredeleniya modulya deformatsii podballastnogo osnovaniya pri rekonstruktsii puti: utverzhdeny Departamentom puti i sooruzhenii OAO «RZHD» 30.11.2009 [Temporary technical conditions for standards and methods for determining the deformation modulus of the substructure during the reconstruction of the track: approved by Department of Track and Constructions of JSC «Russian Railways» dated November 30, 2009].
9. Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu zemlyanogo polotna zheleznykh dorog na puchinistykh gruntakh v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh [Methodological recommendations for the design of the railway roadbed on heaving soils in harsh climatic conditions]. Moscow: TSNIIS Publ., 1986. 49 p.
10. Vedomstvennyye stroitel'nye normy VSN 61-89 Izyskaniya, proektirovanie i stroitel'stvo zheleznykh dorog v raionakh vechnoi merzloty [Departmental building codes VSN 61-89 Surveys, design and construction of railways in permafrost areas]. Moscow: TSNIIS Publ., 1990. 189 p.
11. TSPI 24 Tekhnicheskyye ukazaniya po ustraneniyu puchiny i prosadki zheleznodorozhnogo puti [TSPI 24 Technical instructions for the elimination of depths and subsidence of the railway track]. Moscow: Transport Publ., 1998. 74 p.
12. Ashpiz E.S., Zamukhovskii A.V. Obosnovanie normativov deformativnosti podrel'sovogo i podshpal'nogo osnovaniy [Substantiation of the standards of deformability of the under-rail and under-sleeper bases]. *Mir transporta* [The World of Transport], 2012, no. 5, pp. 112–119.
13. Kotova I.A., Chizhov A.V., Yudin O.G. Tekhniko-ekonomicheskoe sravnenie tekhnologicheskikh variantov ustroystva

podballastnykh zashchitnykh sloev s ispol'zovaniem ob''emnoi georeshetki [Technical and economic comparison of technological options for the device of sub-ballast protective layers using a volumetric geogrid]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2017, no. 1 (40), pp. 36–45.

14. Kazarina V.V., Podverbnyi V.A. Prinyatie resheniya po vyboru varianta trassy zheleznodorozhnoi linii [Decision-making on the choice of the route of the railway line]. *Mir transporta* [The world of transport], 2019, vol. 17, no 3 (82), pp. 140–151.

15. Vremennyye tekhnicheskie usloviya dlya opytnogo primeneniya ob''emnykh georeshetok Neoveb pri ustroistve zashchitnogo podballastnogo sloya [Temporary technical conditions for the experimental use of volumetric geogrid Neoveb in the device of a protective ballast layer]. Moscow: RZHD Publ., 2009. 11 p.

16. Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsii i dolgovechnost' ob''ektov transportnoi infrastruktury (materialy, konstruksii, tekhnologii)» [Proceedings of the scientific and practical conference «Innovation and durability of transport infrastructure facilities (materials, structures, technologies)»]. Saint-Petersburg, 2019. 149 p.

17. Kosenko S.A., Kotova I.A., Akimov S.S. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie ustroistva zashchitnykh podballastnykh sloev iz gruntobetona pri tyazhelovesnom dvizhenii poezdov [Feasibility study of the device of protective sub-ballast layers of ground concrete during heavy train traffic]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering], 2021, vol. 23, no. 1, pp. 161–174.

18. Akimov S.S., Kosenko S.A. Resaikling kak al'ternativnyi sposob povysheniya prochnosti podballastnogo osnovaniya zheleznodorozhnogo puti [Recycling as an alternative way to increase the strength of the substructure of the railway track]. *Materialy nauchnoi konferentsii «Nauka, obrazovanie, kadry» v ramkah IX Mezhdunarodnogo Sibirskogo transportnogo foruma* [Proceedings of the National Conference «Science, education, personnel» within the framework of the IX International Siberian Transport Forum]. Novosibirsk, 2019, pp. 204–212.

19. Polevichenko, A.G., Zhdanova S.M. Protivodeformatsionnye konstruksii dlya stabilizatsii zemlyanogo polotna [Anti-deformation structures for the stabilization of the roadbed]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2005. 82 p.

20. Blazhko L. S., Chuyan S.N., Zakharov V.B., Chernyaev E.V. Analiz sposobov povysheniya nesushchei sposobnosti gruntov osnovnoi ploshchadki zemlyanogo polotna [Analysis of ways to increase the bearing capacity of soils of the main site of the roadbed]. *Izvestiya PGUPS* [Bulletins of Petersburg State Transport University], 2016, no. 3, pp. 328–336.

21. Putevaya mashina AHM 800R (Elektronnyi resurs) [Track machine AHM 800R (Electronic resource)]. Available at: <https://auto-instructors.ru/articles/putevaya-mashina-ahm-800r> (Accessed May 16, 2022).

22. Mashiny dlya ukladki PZS (Elektronnyi resurs) [Sub-ballast protective layer stacking machines (Electronic resource)]. Available at: <https://www.tulazdm.ru/mr-100> (Accessed May 16, 2022).

23. ООО «InfraTekh» – передовые resheniya pri stroitel'stve i remonte (Elektronnyi resurs) [InfraTech LLC – advanced solutions in construction and repair (Electronic resource)]. Available at: <http://eav.ru/publl.php?publid=2010-08a19> (Accessed May 16, 2022).

24. Tekhnologiya OAO «RZHD» ot 06.07.2016 no 447 «Primenenie kompleksa po formirovaniyu zashchitnogo podballastnogo sloya (SHCHOM-2000, MR-100) pri rekonstruksii (modernizatsii) zheleznodorozhnogo puti na seti zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii. [Technology of JSC «Russian Railways» dated July 6, 2016 no 447 «The use of a complex for the formation of a protective sub-ballast layer (SHOM-2000, MR-100) during the reconstruction (modernization) of a railway track on the railway network of the Russian Federation»]. Moscow: RZHD Publ., 2016. 48 p.

25. Dudkin, E.P., Petryaev A.V. Vliyaniye podballastnykh matov na velichinu uprugikh deformatsii puti [The influence of sub-ballast mats on the magnitude of elastic deformations of the track]. *Put' i putevoe hozyaystvo* [Track and track facilities], 2022, no. 7, pp. 16–18.

26. Petryaev A.V., Paramonov V.N. Rashchetnyi analiz povedeniya podshpal'nogo osnovaniya pri ego stabilizatsii geosinteticheskimi materialami [Computational analysis of the behavior of the subshell base during its stabilization by geosynthetic materials]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2022, no. 1 (72), pp. 62–67.

27. Tretyakov V. V. Vliyaniye kharakteristik podballastnogo osnovaniya na intensivnost' nakopleniya rasstroistv puti v vertikal'noi ploskosti [The influence of the characteristics of the subcellular base on the intensity of accumulation of path disorders in the vertical plane]. Ph.D.'s thesis. Moscow, 2008. 163 p.

28. Akashov A.N. Konstruktivno-tekhnologicheskie i organizatsionnye resheniya po povysheniyu stabil'nosti geometrii rel'sovoi kolei na uchastkakh obrashcheniya poezdov povyshennogo vesa i dliny [Constructive, technological and organizational solutions to improve the stability of the geometry of the rail track in the areas of circulation of trains of increased weight and length]. Ph.D.'s thesis. Moscow, 2010. 134 p.

29. Morozova A.A. Nesushchaya sposobnost' podshpal'nogo osnovaniya zheleznodorozhnogo puti na uchastkakh obrashcheniya poezdov s osevmi nagruzkami do 300 kN [Bearing capacity of the base of the railway track on the sections of trains with axial loads up to 300 kN]. Ph.D.'s thesis. Saint-Petersburg, 2014. 184 p.

30. Li S., Ye Y., Tang L. et al. Experimental study on the compaction characteristics and evaluation method of coarse-grained materials for subgrade. *Materials* 2021. 14 (22). 6972. DOI 10.3390/ma14226972.

31. Le T.H.M., Lee S.-H., Park D.-W. Evaluation on full-scale testbed performance of cement asphalt mortar for ballasted track stabilization. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 254, 119249.

32. Saygili A., Dayan M. Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, vol. 161, pp. 107–114.

33. Nie R., Leng W., Yang Q. et al. Comparison and evaluation of railway subgrade quality detection methods. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, vol. 232, no. 2, pp. 356–368.

34. Junyun Zh., Zhuoling H., Siyuan Ch. et al. Vibration response characteristics and application of existing railway subgrade. *Hindawi. Shock and vibration*, 2021, vol. 5/28. 10 p. DOI 10.1155/2021/9926980.

35. Shang Y., Xu L., Zhao Y. et al. Experimental study on the dynamic features of cement-stabilized expansive soil as

subgrade filling of heavy haul railway. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2017, vol. 10, no. 6, 136.

36. SP 131.13330.2020 Stroitel'naya klimatologiya [Set of Rules no 131.13330.2020 Building climatology]. Moscow: Minstroy Publ., 2020. 146 p.

37. Gavrilin A.V., Bykov Yu.A., Podverbnyi V.A., Shivareva E.A. Mnogokriterial'naya optimizatsiya mnozhestva variantov zheleznoi dorogi metodom ideal'noi tochki [Multicriteria optimization of a set of railway options by the ideal point method]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction], 1992, no. 6, pp. 10–11.

38. Podverbnyi V.A., Koven'kin D.A., Filatov E.V. Proektnye resheniya po likvidatsii bol'nogo mesta zemlyanogo polotna v proekte modernizatsii zheleznodorozhnogo puti [Design solutions for the elimination of the sore spot of the roadbed in the railway modernization project]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and education for transport], 2016, no. 2, pp. 181–185.

39. Simonova O.A., Gnezdilova O.A. Otsenka nadezhnosti kalendarnogo grafika stroitel'stva mosta [Assessment of the reliability of the calendar schedule for the construction of the bridge]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no. 1 (11), pp. 272–276.

Информация об авторах

Подвербный Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: vpodverbnyi@mail.ru.

Титов Константин Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: forestgamping@mail.ru.

Холодов Пётр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: petruha_yy@mail.ru.

Гнездилова Ольга Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olangnez@mail.ru.

Information about the authors

Vyacheslav A. Podverbnyi, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Building of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: vpodverbnyi@mail.ru.

Konstantin M. Titov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Building of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: forestgamping@mail.ru.

Petr N. Kholodov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: petruha_yy@mail.ru.

Ol'ga A. Gnezdilova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Building of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail : olangnez@mail.ru.

Линеаризация взаимодействия внутренней и внешней кинематики длиннобазных грузовых вагонов для прохода кривых малого радиуса

В.В. Тюньков✉, Л.В. Мартыненко, Д.И. Павлова, Саранзаяа Атарцэцэг

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

✉tunkov@bk.ru

Резюме

В статье рассматривается возможность конструктивной адаптации сборочных узлов кинематической цепочки сопряженных деталей от автосцепки до контакта «колесо – рельс» на основе увеличения степени свободы узла «пятник – подпятник» для прохода составом кривых железнодорожного пути, в том числе малого радиуса и горно-перевальных участков. Принимается во внимание замкнутость системы нагрузок и воздействий поезда с верхним строением пути. Особое внимание уделяется прикладному использованию теории простых и сложных связанных систем с выходом на определенное конструктивное решение для обеспечения нормативного уровня безопасности движения железнодорожного подвижного состава и позитивной реализации его технического и технологического ресурса. Подход к решению задач повышения уровня ситуационной надежности, снижения износа взаимодействующей пары «колесо – рельс» на принципах адаптивного алгоритма, а также минимизации вероятности аварийного схода вагонов на кривых малого радиуса реализуется путем включения в замкнутую систему элемента, обладающего ресурсом адаптивности и безопасного перевода дестабилизирующего воздействия в другую матрицу. Поскольку методы линеаризации имеют ограниченный характер, т. е. эквивалентность исходной нелинейной системы сохраняется лишь для ограниченных временных масштабов системы либо для определенных процессов при движении поезда, то при переходе с одного режима работы на другой следует контролировать и адекватность ее линеаризованной модели. Как пример предложен вариант эксцентрикового сочленения кузова с тележкой грузового вагона. Результат действителен не только для исследованных грузовых вагонов, но и для всего подвижного железнодорожного состава, использующего автосцепное оборудование типа СА-3. В прикладной результативной части предлагается вариант функционального «адаптивного» расширения узла соединения шкворневой балки рамы вагона с тележкой с целью безопасного перевода выявленного дестабилизирующего воздействия в сопредельную матрицу.

Ключевые слова

длиннобазовые грузовые вагоны, автосцепка, сборочный узел, адаптивный шкворень, внутренняя кинематика вагона, ресурс адаптивности, безопасность движения, внешнее воздействие

Для цитирования

Линеаризация взаимодействия внутренней и внешней кинематики длиннобазовых грузовых вагонов для прохода кривых малого радиуса / В.В. Тюньков, Л.В. Мартыненко, Д.И. Павлова, Саранзаяа Атарцэцэг // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 72–80. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).72-80.

Информация о статье

поступила в редакцию: 19.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 19.12.2022 г.; принята к публикации: 20.12.2022 г.

Linearization of internal and external kinematics interaction of long-based freight wagons for passing small radius curves

V.V. Tyun'kov✉, L.V. Martynenko, D.I. Pavlova, Saranzayaa Atartsetseg

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉tunkov@bk.ru

Abstract

The possibility of constructive adaptation of the assembly units of the kinematic chain of conjugated parts from the automatic coupler to the wheel-rail contact is considered on the basis of increasing the degree of freedom of the center-to-center assembly for the train to pass curves of the railway track, including small radius and mountain pass sections. The closedness of the system of loads and the «train - superstructure of the track» influences are taken into account. Particular attention is paid to the applied use of the theory of simple and complex coupled systems with access to a certain design solution to ensure the normative level of traffic safety and positive implementation of the technical and technological resource of railway rolling stock. An approach to solving the problem of increasing the level of situational reliability, wear of an interacting wheel-rail pair based on the principles of an adaptive algorithm, as well as minimizing the probability of an emergency derailment of cars on curves of a small radius is achieved by including an element into a closed system that has an adaptability resource and the safe transfer of a destabilizing influences to another matrix. Since the linearization methods are limited, i.e., the equivalence of the original nonlinear system is

preserved only for limited time scales of the system, or for certain processes during the movement of the train, then when switching from one operating mode to another, the adequacy of its linearized model should also be controlled. As an example, a variant of the eccentric articulation of the body with the bogie of a freight car is proposed. The result is valid not only for the studied freight cars, but also for the entire rolling stock using automatic coupling equipment of the SA-3 type. In the applied effective part, a variant of the functional «adaptive» expansion of the junction of the pivot beam of the car frame with the bogie is proposed in order to safely transfer the identified destabilizing effect to the adjacent matrix.

Keywords

long-base freight wagons, automatic coupler, assembly unit, adaptive kingpin, wagon internal kinematics, adaptability resource, traffic safety, external impact

For citation

Tyun'kov V.V., Martynenko L.V., Pavlova D.I., Atartsetseg Saranzayaa. Linearizatsiya vzaimodeistviya vnutrennei i vnesheinei kinematiki dlinnobaznykh gruzovykh vagonov dlya prokhoda krivykh malogo radiusa [Linearization of internal and external kinematics interaction of long-based freight wagons for passing small radius curves]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 72–80. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).72-80.

Article info

Received: October 19, 2022; Revised: December 19, 2022; Accepted: December 20, 2022.

Введение

Модернизация Восточного полигона железной дороги РФ, которая предполагает увеличение провозной способности полигона к 2023 г. со 124,9 до 180 млн т и до 200 млн т ежегодно на период до 2025 г. [1]. Одним из приоритетных перспективных направлений является интенсификация интермодальных перевозок большегрузными контейнерами. Для их перемещения выделяются преимущественно длиннобазовые платформы. Однако они отличаются затрудненным проходом горно-перевальных участков, в том числе кривых малого радиуса, которыми насыщен Восточный полигон.

В связи с этим сохранение достигнутого уровня безопасности перевозок предполагает комплекс мер, включая конструктивное совершенствование элементов, значимых для режима технической эксплуатации подвижного состава. Рассматривая железнодорожный грузовой вагон как взаимосвязанную систему со сложной внутренней кинематикой, сочетающуюся циклически непосредственно в контакте «колесо –

рельс», а также связанную через автосцепку с другими вагонами сформированного поезда, приходим к выводу о необходимости рационализации сборочных узлов и деталей, участвующих в процессах, влияющих на повышенный износ и негативную динамику объекта, особенно при движении в порожнем состоянии и при различных видах торможения [2].

Исходная позиция

При исследовании факторов, приводящих к сходу вагона с рельса, принимаем замкнутую нелинейную техническую систему, состоящую из ограниченного числа элементов, которая рассчитана на определенный уровень воздействий, в том числе внешних, без выхода за нормированное предельное состояние. Внешние воздействия на вагон, движущийся в составе поезда, концентрируются, с одной стороны, в сочленении автосцепки, а с другой – в контакте «колесо – рельс». Последующая реакция на воздействия зависит от его величины и направления. Для нашего случая



Рис. 1. Схема замкнутой системы внешних механических воздействий на вагон, движущийся в составе поезда
Fig.1. Scheme of a closed system of external mechanical influences on a car moving as part of a train

определяющим является направление, имеющее поперечную (боковую) составляющую, которая возникает при проходе кривых и при определенном сочетании параметров узла достигает величины, близкой к критической. Таким образом, имеем замкнутую систему, в которой дисфункция в одном из узлов взаимодействия приводит к разрыву системы, что является фактором, приводящим, например, к сходу вагона с рельса (рис. 1). Этот же фактор приводит к фиксированному изгибу корпуса автосцепки и его последующему восстановительному деповскому ремонту [3].

Описание предлагаемой тенденции

Многочисленные исследования, подтверждающие актуальность рассматриваемой проблемы, концентрируются на сходе вагона с рельса. При этом устойчивость колеса против схода с рельса проверяется для наиболее опасного случая сочетания большой поперечной силы взаимодействия набегающего колеса с рельсом и малой вертикальной нагрузки на это колесо [4]. Сложная ситуация складывается при движении поезда на горно-перевальных участках в кривых малого радиуса [5], при том, что механическая составляющая процесса, так или иначе, конвертируется повышенным износом и функциональными сбоями, трансформируясь через процесс динамического взаимодействия

[6]. В связи с этим полезна предварительная линеаризация и по-возможности минимизация дестабилизирующих воздействий в межузловых контактах. Поскольку одним из системообразующих сборочных элементов является колесная пара, которая совмещает взаимодействие кузова и рельсов, рассмотрим ее адаптивный вариант, направленный на смягчение воздействий. Оценивая эффективность в рамках технологического алгоритма [7], который предусматривает в качестве ограничений минимизацию изменений в действующих кинематических связях, можно говорить о стабилизации всего процесса в коридоре эффективности, близкому к оптимальному. Отметим также, что, например, четырехбуксовая колесная пара с осевой стабилизацией позволяет повысить передаваемую нагрузку за счет двухбуксовой симметричной схемы передачи ее на каждое колесо, уменьшить износ узлов и деталей ходовой части вагонов при вписывании в кривые, снизить энергозатраты на движение подвижного состава за счет уменьшения виляния (рыскания) тележек и уменьшить боковые силы, возникающие при взаимодействии подвижного состава и пути [8].

По своему генезису предлагаемое к реализации изобретение относится к области вагоностроения и может быть использовано при создании тележек железнодорожного вагона с повышенным ресурсом, а именно к элементам, лежа-

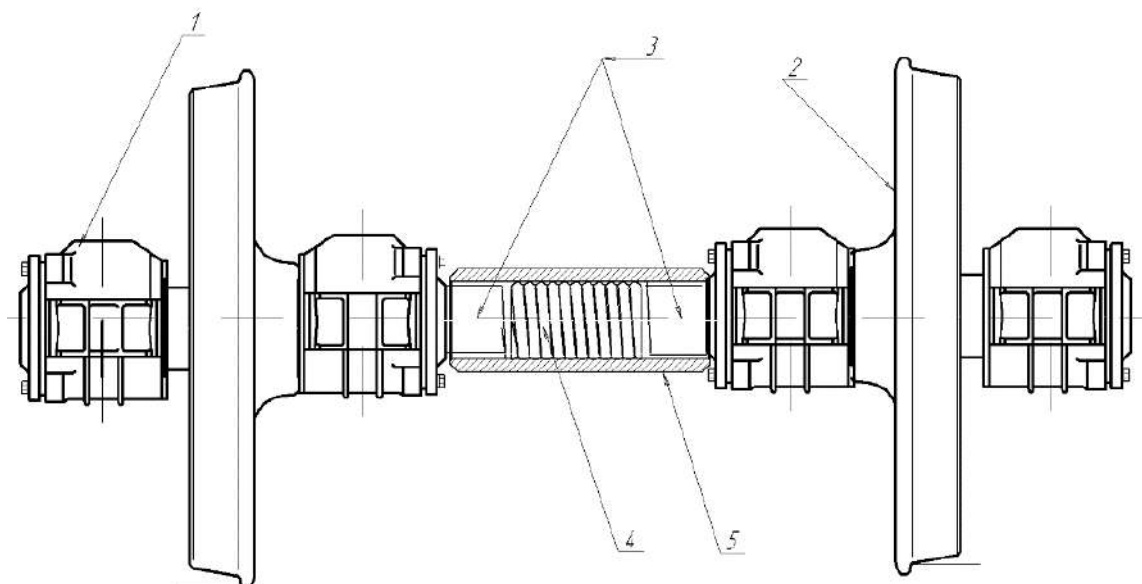


Рис. 2. Четырехбуксовая колесная пара с развязывающим сумматором:

1 – буксовый узел; 2 – колесо; 3 – ось правого и левого модуля;

4 – фиксирующая пружина; 5 – предохранительная втулка

Fig. 2. Four-axle wheel pair with decoupling adder:

1 – axle box; 2 – wheel; 3 – axis of the right and left modules; 4 – fixing spring; 5 – safety sleeve

щим в основе конструкции транспортных средств и предназначенным для использования в ходовой части подвижного состава железных дорог. Данное устройство обеспечивает заданные (повышенные) параметры движения за счет рассеивания каналов передачи динамических внешних воздействий и дезинтегрирует проходящий по оси колесной пары канал вредных вибраций узлов и деталей. Устройство обеспечивает минимизацию паразитных связей, проявляющихся при движении колесной пары, которые вызывают износ элементов подвижного состава и верхнего строения пути с общим сокращением ресурса, особенно со скоростями движения выше 160 км/ч [9].

Поставленная цель достигается тем, что в самоподстраивающуюся схему движения и взаимодействия деталей и элементов колесной пары встроен развязывающий сумматор, который, сохраняя полезные связи и воздействия, в то же время смягчает вредные, возникающие в транспортном средстве при проходе сложных профилей, в том числе трехмерных, а также при износах узлов и деталей, близких к предельно допустимым [10] (рис. 2).

Формула функционального узла «четырехбуксовая колесная пара» с осевой стабилизацией для железнодорожного подвижного состава, содержащая два ведомых колеса с элементными полуосями и центральный развязывающий сумматор, отличающаяся тем, что дифференцированную компенсированную ось, состоящую из двух симметричных композиций «элементарная полуось» + «ведомое колесо», компонуют разжимающей пружиной, закрепленной в стакане только от поперечного смещения и защитно-ограничительного цилиндра,

одеваемого на антифрикционную втулку с фланцем, которая с ходовой посадкой обеспечивает свободное вращательное движение относительно полуосей цилиндра, создающего фиксированный максимально допустимый уход гребня колеса от головки рельса, при этом развязывающий сумматор окончательно формирует колесную пару после установки буксовых узлов и рессорной системы, которая далее сопрягается по одному из возможных вариантов с несущим силовым каркасом транспортного средства [11].

Исследуем другую возможность поглощения бокового перемещения (воздействия) в композиции внутренней кинематики грузового вагона. Из уровня техники известен шкворневой узел полувагона, состоящий из хребтовой и шкворневой балок рамы, надрессорной балки тележки, надпятника, пятника и шкворня, соединяющего раму полувагона и тележку. Шкворень выполнен в виде стержня и пропущен сквозь соосные отверстия хребтовой балки, надпятника, пятника и надрессорной балки, выполненной с подпятником – местом опоры пятника на надрессорной балке [12]. Здесь предлагаются различные модификации, необходимые для закрепления шкворня с целью подтверждения его функции фиксации соединения в вертикальном положении. Отметим, что перемещение в горизонтальной плоскости может быть только за счет нерегулируемых зазоров, износа или изгиба. Известно также, что критическое сочетание действующих на колесную пару сил рассматривается в случае экстренного торможения поезда повышенного веса на малой скорости с головного локомотива при прохождении составом кривого участка пути,

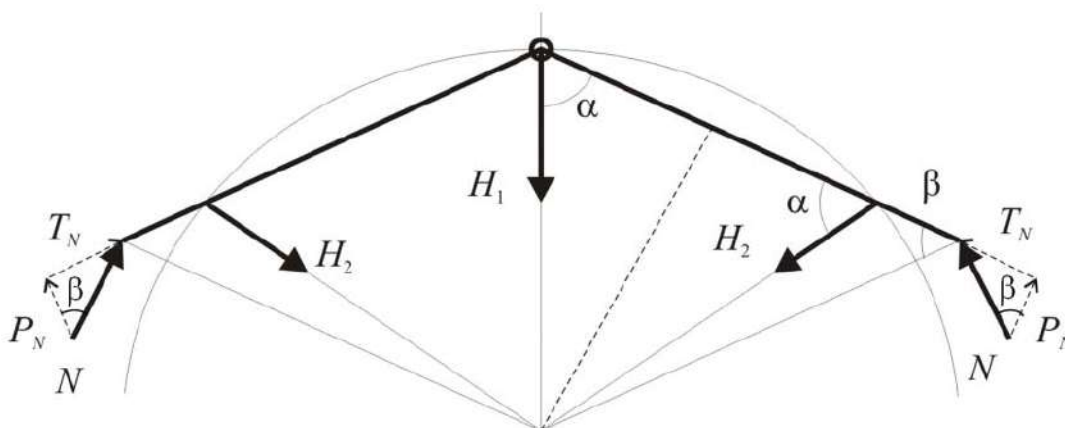


Рис. 3. Схема положения сочлененного вагона в кривой при действии сжимающих сил в автосцепках
Fig. 3. Scheme of an articulated car position in a curve under the action of compressive forces in automatic couplers

когда возникающие значительные квазистатические усилия сжатия состава могут привести к выжиманию средней тележки за счет появления больших поперечных сил взаимодействия колес с рельсами (рис. 3).

Здесь, совмещая принципы линеаризации с возможностью конструктивной адаптации в сопряжении кузова вагона с тележкой, используем вариант эксцентриковой реакции шкворня соединения «пятник – подпятник». Согласно схеме (см. рис. 1) рассмотрим один из узлов внутренней кинематики вагона, который оказывает значительное влияние на проход кривых, генерирующий дополнительное боковое воздействие в контакте «колесо – рельс» и стимулирующий процесс схода вагона. Это связано с тем, что при проходе кривой пятник и подпятник, оставаясь на оси пути, участвуют в формировании габарита вагона. Оси вагонов поезда находятся под углом друг другу, который не всегда компенсируется горизонтальным движением автосцепки при условии неразмыкания и в этом случае воздействует на ударную розет-

ку упорной плиты, через шкворневое соединение на тележку и далее на рельс (рис. 4).

Этому процессу и отдельным его частям посвящено большое количество работ как исследователей подвижного состава, так и путейцев. В данной работе сделана попытка частичного решения проблемы на одном из узлов внутренней кинематики грузового вагона.

Прикладной аспект

С увеличением базы вагона и уменьшением радиуса кривой возникают трудности с выполнением габарита и работы автосцепки. Наиболее явно это отражается величиной выноса центра вагона h , а также выноса концов вагона на величину меньше h [13]. Исходя из геометрии процесса имеем:

$$h = R \cdot [1 - \cos(\alpha/2)],$$

где R – радиус кривой; α – угол сегмента.

В процессе эксплуатации поездов создаваемое движение при растяжении и сжатии вагонов ставит продольные оси автосцепок под углом друг к другу, уменьшая величину горизон-

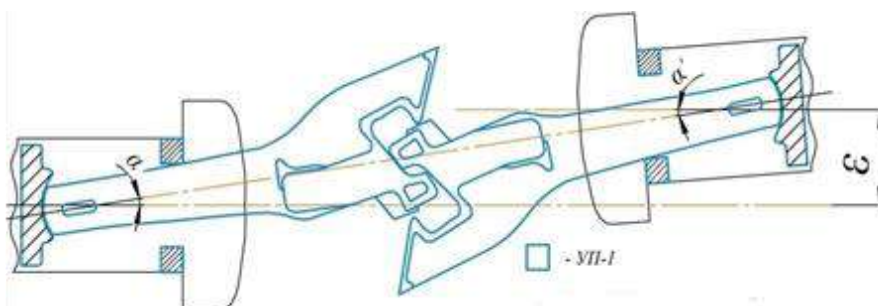


Рис. 4. Схема формирования бокового воздействия на выходе из кривой (ε – величина смещения осей вагонов)
Fig. 4. Scheme of the formation of the lateral impact at the exit from the curve (ε – the value of the car axes displacement)

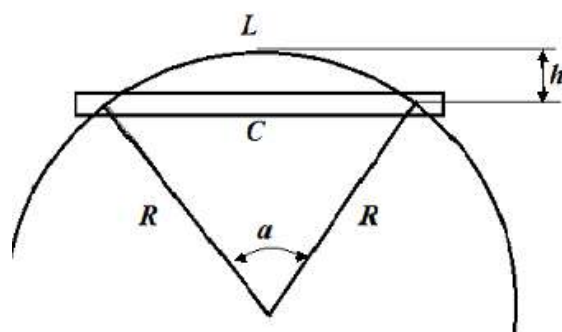


Рис. 5. Геометрическое формирование габарита на кривой:
 L – длина дуги сегмента; c – хорда (база вагона); R – радиус; α – угол сегмента;
 h – высота (вынос центра вагона)

Fig. 5. Geometric overall dimension formation on a curve:
 L – the segment arc length; c – chord (car base); R – the radius; α – the segment angle;
 h – height (removal of the car center)

тального перемещения только за счет зазоров в узлах сопряжения. Критические состояния, проявляющиеся в системе (см. рис. 1) при случайном сочетании негативных флуктуаций, приводят к изгибу корпуса автосцепки и появлению поперечной силы в контакте «колесо – рельс», которая стимулирует сход вагона с рельса [14].

Рассмотрим ограничения для одного вагона, возникающие при проходе кривой (рис. 5) и проведем расчеты при длине базы вагона 10–20 м и радиусах кривой 650, 300 и 200 м (табл.).

Вынос центра вагона колеблется в интервале 2–25 см, что предполагает смещение конца каждого вагона при данных параметрах на ве-

личину до 15 см, изменяясь по формуле в зависимости от базы вагона и радиуса кривой. Тогда возможная конструктивная интерпретация шкворня в соединении «пятник – подпятник», использованная ранее для других случаев [15], приобретает вид (рис. 6).

При проходе кривой тележка грузового вагона под воздействием рельса на гребень колесной пары идет по оси пути, а адаптивный ресурс эксцентрикового шкворня частично или полностью компенсирует смещение осей вагона – ε (см. рис. 4), конвертируя боковое воздействие в продольную составляющую. Этот конструктивный прием реализован в изобретении новой рационализации в

Расчетная величина выноса центра вагона на кривой
The calculated value of the removal of the center of the wagon on the curve

Радиус кривой, м Curve radius, m	База вагона, м Car base, m	Вынос центра, м Removal of the center, m	Угол сегмента, град The segment angle, degrees
650	10	0,02	0,88
	15	0,04	1,32
	20	0,08	1,76
300	10	0,04	1,91
	15	0,09	2,87
	20	0,17	3,82
200	10	0,06	2,87
	15	0,14	4,30
	20	0,25	5,73

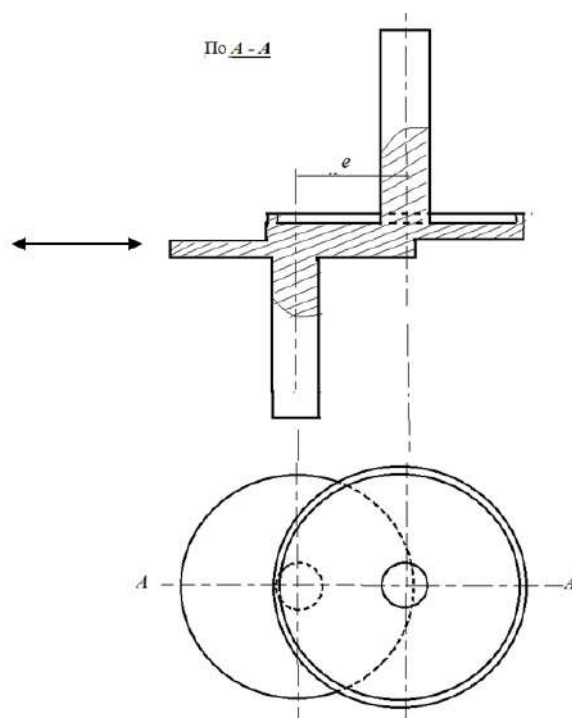


Рис. 6. Эскиз адаптивного шкворня для соединения рамы вагона с тележкой
Fig. 6. Sketch of an adaptive king pin for connecting the car frame with the bogie

длиннобазной железнодорожной вагон-платформе для перевозки крупнотоннажных контейнеров (рис. 7).

Использованный принцип внутрисистемной адаптивности узлов и деталей при возникновении экстремальных нагрузок и воздействий позволяет стабилизировать систему внутренней и внешней кинематики подвижного железнодорожного состава (см. рис. 1), а также упростить движение на переходе «магистральная инфраструктура – транспортные пути промышленного объекта». Таким образом, в приводимом примере оперативного (без крупных конструктивных изменений) внедрения рассматриваемого принципа с использованием технологического алгоритма решается существенная задача улучшения эксплуатационных характеристик без повышения трудоемкости изготовления, диагностики и ремонтпригодности. Например, для демонстрации принципа работы предлагаемого механизма поставлена задача конструктивного решения для вагона-платформы более экономичного при изготовлении и в условиях эксплуатации [16].

Поставленная задача решается тем, что, согласно предполагаемому изобретению, в вагоне-платформе (преимущественно для контейнеров), содержащем ходовые части с установленной на них рамой, на которой размещены автосцепные устройства, тормозное оборудование с отдельным приводом на каждую тележку и упоры для закрепления контейнеров, выполненной из продольных, поперечных и концевых балок, представленное композиционное предложение включает демонтаж (например, соединение посредством шкворня-адаптера) допол-

нительных промежуточных тележек в средней части несущей рамы вагона с целью увеличения числа колесных пар вагон-платформы, находящихся под нагрузкой [17].

Технический результат заключается в повышении грузоподъемности платформы, ее погонной нагрузки и уменьшении коэффициента тары за счет увеличения числа колесных пар, воспринимающих нагрузку. Суть предлагаемого изобретения заключается в том, что длиннобазовая железнодорожная вагон-платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров, включающая раму, тележки, автосцепные устройства и тормозное оборудование с отдельным приводом на каждую тележку, и общим воздухораспределителем с запасным резервуаром дополняется тем, что в средней части платформы устанавливается вместо промежуточной поперечной балки шкворневая балка рамы для сопряжения с тележкой шкворнем-адаптером, который функционально позволяет выполнять в кривых железнодорожного пути смещение средней части рамы относительно тележки на величину не менее ее бокового выноса исходного габарита [18].

В дополнение к этой полезной функции (адаптивности) предлагаемое конструктивное решение шкворня может уменьшить износ узла соединения кузова платформы с тележкой, т. е., сопрягаемую поверхность «пятник – подпятник».

Заключение

В рамках общей проблемы – безопасного прохода горно-перевальных участков и кривых малого радиуса – рассмотрены и предложены конструктивные варианты включения в матри-

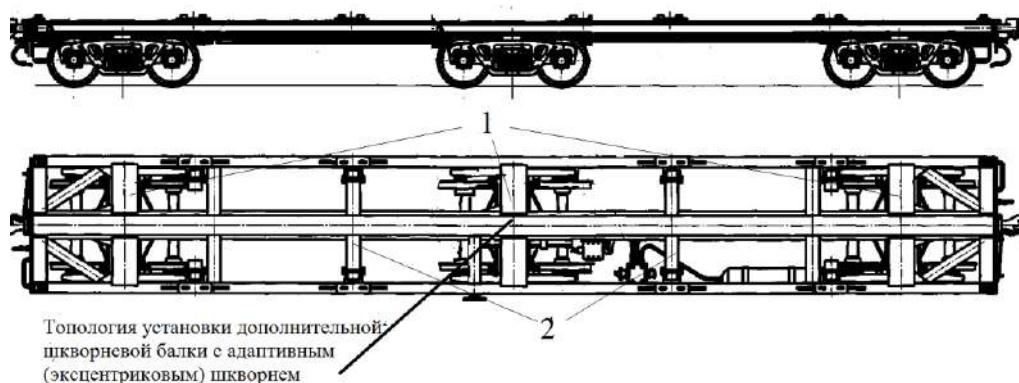


Рис. 7. Реализованная установка адаптивного шкворня:
1 – шкворневая балка; 2 – поперечная

Fig. 7. Implemented installation of the adaptive kingpin:
1 – pivot beam; 2 – transverse

цу внутренней кинематики вагона детали, повышающей адаптацию грузового вагона к внешним дестабилизирующим воздействиям, в том числе через автосцепку соприкасающегося вагона. Подход к решению задачи повышения уровня ситуационной надежности, износа взаимодействующей пары «колесо – рельс» на принципах адаптивного алгоритма, а также минимизации вероятности аварийного схода вагонов на кривых малого радиуса достигается путем включения в замкнутую систему элемента, обладающего ресурсом адаптивности и безопасному переводу дестабилизирующего воздействия в другую матрицу. Поскольку методы линеаризации имеют ограниченный характер, т. е. эквивалентность исходной нелинейной си-

стемы (см. рис. 1) сохраняется лишь для ограниченных временных масштабов системы либо для определенных процессов при движении поезда, то при переходе с одного режима работы на другой следует контролировать и адекватность ее линеаризованной модели.

Как пример предложен вариант эксцентрикового сочленения кузова с тележкой грузового вагона (см. рис. 6). Результат действителен не только для исследованных грузовых вагонов, но и для всего подвижного железнодорожного состава, использующего автосцепное оборудование типа СА-3. Реализация поставленной задачи допускает инвариантность с учетом действующих базовых технических норм и ограничений.

Список литературы

1. Восточный полигон получил зеленый свет // РБК : сайт // URL: <https://www.rbc.ru/newspaper/2020/02/10/5e3d83999a794763c6d0d675> (Дата обращения: 01.10.2022).
2. Орлова А.М., Смирнов Н.В., Козлов П.В. Особенности динамического поведения сочлененных вагонов // Вагоны и вагонное хозяйство. 2010. № 4. С. 32–34.
3. Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N., Martynenko L.V. Force loading of wagon during interaction of truck and bodywork in curves paths // AER-Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 158. Pp. 130–134.
4. Методические указания по применению статических и кинематических габаритов подвижного состава на железных дорогах-членах организации сотрудничества железных дорог колеи 1435 и 1520 мм / Р 500/4 : утв. совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу от 18.10.2016. Варшава, 2016. 86 с.
5. Смольянинов А.В., Якупов А.Р. Сравнительный анализ методик расчета устойчивости колесной пары от схода с рельсов // Транспорт Урала. 2017. № 1. С. 48–54.
6. Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist / M. Bagheri, F. Saccomanno, Sh. Chenouri et al. // Accident; Analysis & Prevention. 2011. Vol. 43 (3). Pp. 613–620.
7. Eom B.-G., Lee H.S. Assessment of running safety of railway vehicles using multibody dynamics // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2010. Vol. 11 (2). Pp. 315–320.
8. Gilchrist A.O., Brickle B.V. A re-examination of the proneness to derailment of a railway wheelset // Journal of Mechanical Engineering Science. 1976. Vol. 18 (3). Pp. 131–141.
9. Continuous measurement of interaction forces between wheel and rail / Y.-S. Ham, D.-H. Lee, S.-J. Kwon et al // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2009. Vol. 10 (1). Pp. 35–39.
10. Theoretical cross-wind speed against rail vehicle derailment considering the cross-running wind of trains and the dynamic wheel-rail effects / M.S. Kim, G.Y. Kim, H.T. Kim et al. // Journal of Mechanical Science and Technology. 2016. Vol. 30 (8). Pp. 3487–3498.
11. Koo J. A new derailment coefficient considering dynamic and geometrical effects of a single wheel-set // Journal of Mechanical Science and Technology. 2014. Vol. 28 (9). Pp. 3483–3498.
12. Liu X., Saat M.R., Barkan Ch. P.L. Freight-train derailment rates for railroad safety and risk analysis // Accident Analysis & Prevention. 2017. Vol. 98. Pp. 1–9.
13. Синтез конструктивных решений на основе демпфирования в пределах внутренней кинематики грузовых вагонов / В.В. Тюньков, Н.П. Рычков, В.С. Бузунова и др. // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2021. № 3 (11). С. 9–16.
14. Тюньков В.В., Бузунова В.С., Пашков А.Е. Технологический алгоритм в перспективном конструктивном развитии железнодорожных грузовых вагонов колеи 1520 мм // Молодая наука Сибири. 2020. № 4 (10). С. 18–26.
15. Козлов П.В. Влияние базы вагона-платформы сочлененного типа на запас устойчивости от схода колеса с рельса // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. № 4. С. 55–62.
16. Мямлин С.В. Моделирование динамики рельсовых экипажей. М. : Новая идеология, 2002. 240 с.
17. Кузович В.М. Динамическая нагруженность специализированных вагонов в криволинейных участках пути : дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 211 с.
18. Маджидов Ф.А. Оценка параметра безопасности грузового вагона и управление эффективностью его использования с учетом изменения параметров эксплуатационной среды // Безопасность движения поездов : материалы XVII науч.-практ. конф. М., 2016. С. 96–98.

References

1. Vostochnyi poligon poluchil zelenyi svet (Elektronnyi resurs) [The Eastern polygon has received the green light (Electronic resource)]. Available at: <https://www.rbc.ru/newspaper/2020/02/10/5e3d83999a794763c6d0d675> (Accessed October 1, 2022).

2. Orlova A.M., Smirnov N.V., Kozlov P.V. Osobennosti dinamicheskogo povedeniya sochlenennykh vagonov [Features of dynamic behavior of articulated wagons]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo* [Wagons and wagon facilities], 2010, no. 4, pp. 32–34.
3. Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N., Martynenko L.V. Force loading of wagon during interaction of truck and bodywork in curves paths. *AER-Advances in Engineering Research*, 2018, vol. 158, pp. 130–134.
4. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu staticheskikh i kinematicheskikh gabaritov podvizhnogo sostava na zheleznykh dorogakh-chlenakh organizatsii sotrudnichestva zheleznykh dorog kolei 1435 i 1520 mm / R 500/4 : utverzhdeny soveshchaniem Komissii OSZhD po infrastrukture i podvizhnomu sostavu 18-21 oktyabrya 2016 goda [Methodological guidelines for the use of static and kinematic dimensions of rolling stock on railways-members of organization of railway cooperation of gauge 1435 and 1520 mm / R 500/4 : approved by the meeting of the organization of railway cooperation's Commission on Infrastructure and Rolling Stock on October 18–21, 2016]. Warsaw, 2016. 86 p.
5. Smol'yaninov A.V., Yakupov A.R. Sravnitel'nyi analiz metodik rascheta ustoichivosti kolesnoi pary ot skhoda s rel'sov [Comparative analysis of methods for calculating the stability of a wheelbase from derailment]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2017, no. 1, pp. 48–54.
6. Bagheri M., Saccomanno F., Chenour, Sh., Fu L. Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist. *Accident; Analysis & Prevention*, 2011, vol. 43 (3), pp. 613–620.
7. Eom B.-G., Lee H.S. Assessment of running safety of railway vehicles using multibody dynamics. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, vol. 11 (2), pp. 315–320.
8. Gilchrist A.O., Brickle B.V. A re-examination of the proneness to derailment of a railway wheelset. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1976, vol. 18 (3), pp. 131–141.
9. Ham Y.-S., Lee D.-H., Kwon S.-J., You W.-H., Oh T.-Y. Continuous measurement of interaction forces between wheel and rail. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2009, vol. 10 (1), pp. 35–39.
10. Kim M.S., Kim G.Y., Kim H.T., Koo J. Theoretical cross-wind speed against rail vehicle derailment considering the cross-running wind of trains and the dynamic wheel-rail effects. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, vol. 30 (8), pp. 3487–3498.
11. Koo J. A new derailment coefficient considering dynamic and geometrical effects of a single wheel-set. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, vol. 28 (9), pp. 3483–3498.
12. Liu X., Saat M.R., Barkan Ch. P.L. Freight-train derailment rates for railroad safety and risk analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, vol. 98, pp. 1–9.
13. Tyun'kov V.V., Rychkov N.P., Buzunova V.S., Romashov A.V. Sintez konstruktivnykh reshenii na osnove dempfirovaniya v predelakh vnutrennei kinematiki gruzovykh vagonov [Synthesis of constructive solutions based on damping within the internal kinematics of freight wagons]. *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnyimi sistemami* [Information technologies and mathematical modeling in the management of complex systems], 2021, no. 3 (11), pp. 9–16.
14. Tyun'kov V.V., Buzunova V.S., Pashkov A.E. Tekhnologicheskii algoritm v perspektivnom konstruktivnom razvitii zheleznodorozhnykh gruzovykh vagonov kolei 1520 mm [Technological algorithm in the prospective constructive development of railway freight cars of 1520 mm gauge]. *Molodaya nauka Sibiri* [The young science of Siberia], 2020, no. 4 (10), pp. 18–26.
15. Kozlov P.V. Vliyaniye bazy vagona-platformy sochlenennogo tipa na zapas ustoichivosti ot skhoda kolesa s rel'sa [Influence of the base of the articulated platform car on the stability margin from wheel derailment]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Saint Petersburg Transport University], 2011, no. 4, pp. 55–62.
16. Myamlin S.V. Modelirovanie dinamiki rel'sovykh ekipazhei [Modeling the dynamics of rail vehicles]. Moscow: Novaya ideologiya Publ., 2002. 240 p.
17. Kuzovich V.M. Dinamicheskaya nagruzhennost' spetsializirovannykh vagonov v krivolineinykh uchastkakh puti [Dynamic loading of specialized wagons in curved sections of the track]. Ph.D's thesis. Moscow, 2010. 211 p.
18. Madzhidov F.A. Otsenka parametra bezopasnosti gruzovogo vagona i upravlenie effektivnost'yu ego ispol'zovaniya s uchetom izmeneniya parametrov ekspluatatsionnoi sredy [Estimation of the safety parameter of a freight car and management of the efficiency of its use, taking into account changes in the parameters of the operating environment]. *Materialy XVII Nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bezopasnost' dvizheniya poezdov»* [Proceedings of the XVII Scientific and Practical Conference «Train Traffic Safety»]. Moscow, 2016, pp. 96–98.

Информация об авторах

Тюньков Владислав Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: tunkov@bk.ru.

Мартыненко Любовь Викторовна, старший преподаватель кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: liuba.martinenko @yandex.ru.

Павлова Дарья Игоревна, кафедра вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: dasha_pavlova_00@inbox.ru.

Атарцэцэг Саранзаяа, кафедра вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: saraa.1234@yahoo.com.

Information about the authors

Vladislav V. Tyun'kov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Wagons and wagons facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: tunkov@bk.ru.

Lyubov' V. Martynenko, Assistant Professor of the Department of Wagons and wagons facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: liuba.martinenko @yandex.ru.

Dar'ya I. Pavlova, Department of Wagons and wagons facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: dasha_pavlova_00@inbox.ru.

Saranzayaa Atartsetseg, Department of Wagons and wagons facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: saraa.1234@yahoo.com.

Создание модели тензометрической колесной пары с применением программного комплекса «Универсальный механизм»

М.Г. Акашев^{1,2}✉, А.Н. Савоськин², В.В. Чунин¹

¹Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, г. Коломна, Российская Федерация

²Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация

✉akashev-mg@vnikti.com

Резюме

Достижение непрерывного процесса взаимодействия колеса с рельсом могло бы решить многие проблемы в области безопасности движения железнодорожного транспорта. Вопросом определения сил в контакте колеса с рельсом ученые занимаются с середины прошлого века, и он до сих пор актуален. Современные технологии шагнули далеко вперед, что позволяет создавать более качественные средства измерения, к которым можно отнести и тензометрическую колесную пару. При этом моделированию тензометрических колесных пар уделялось недостаточно внимания, хотя это очень важная задача, позволяющая ответить на многие вопросы и решить некоторые проблемы изобретения такого средства измерения еще на стадии проектирования. В статье описывается процесс создания модели тензометрической колесной пары с применением программного комплекса «Универсальный механизм» на базе существующей патентной разработки. Рассмотрены такие стадии построения модели, как подготовка конечно-элементной упругой колесной пары, определение мест расположения тензорезисторов. Проанализировано напряженно-деформированное состояние колеса при его вращении и определено оптимальное количество тензорезисторов для получения в дальнейшем непрерывных случайных процессов взаимодействия колеса с рельсом. Полученная модель показала хорошую сходимость результатов при определении вертикальных и боковых сил в контакте колеса с рельсом. В то же время остается много неисследованных моментов, которые помогли бы усовершенствовать модель тензометрической колесной пары.

Ключевые слова

тензометрическая колесная пара, вертикальная сила, боковая сила, контакт «колесо – рельс», напряженно-деформированное состояние, программный комплекс «Универсальный механизм», подвижной состав

Для цитирования

Акашев М.Г. Создание модели тензометрической колесной пары с применением программного комплекса «Универсальный механизм» / М.Г. Акашев, А.Н. Савоськин, В.В. Чунин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 81–91. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).81-91.

Информация о статье

поступила в редакцию: 20.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 22.12.2022 г.; принята к публикации: 23.12.2022 г.

Creating a strain-gauge wheel set model using software package «Universal mechanism»

M.G. Akashev^{1,2}✉, A.N. Savos'kin², V.V. Chunin¹

¹Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock, Kolomna, the Russian Federation

²Russian University of Transport, Moscow, the Russian Federation

✉akashev-mg@vnikti.com

Abstract

Achieving a continuous process of wheel-rail interaction could solve most of the problems in the field of railway traffic safety. Scientists have been studying the issue of determining forces in the wheel-rail contact since the middle of the last century, and it is still relevant. Modern technologies have stepped far ahead, which allows to create measuring instruments of a better quality, including a strain-gauge wheel set. At the same time, insufficient attention has been paid to the simulation of strain-gauge wheel sets, although this is a very important task allowing to answer many questions and solve some problems of creating such a measuring tool at the design stage. The article describes the process of creating a strain-gauge wheel set model using software package «Universal Mechanism» based on the existing patent design. Such stages of the model creation are considered as preparation of a finite-element elastic wheel set, determination of locations of strain gauges. The wheel stress-strain state during its rotation is analyzed and the optimal number of strain gauges is determined to further obtain continuous random processes of the wheel-rail interaction. The resulting model has shown good convergence of results in determining vertical and lateral forces in the wheel-rail contact. At the same time, there are many aspects to be studied that would help to improve the strain-gauge wheel set model.

Keywords

strain-gauge wheel set, vertical force, lateral force, wheel-rail contact, stress-strain state, the «Universal Mechanism» software package, rolling stock

For citation

Akashev M.G., Savos'kin A.N., Chunin V.V. Sozdanie modeli tenzometricheskoi kolesnoi pary s primeneniem programmogo kompleksa «Universal'nyi mekhanizm» [Creating a strain-gauge wheel set model using software package «Universal mechanism»]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 81–91. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).81-91.

Article info

Received: October 20, 2022; Received: December 22, 2022; Accepted: December 23, 2022.

Введение

Тензометрическая колесная пара (ТКП) является средством измерения, позволяющим проводить кусочно-непрерывную регистрацию вертикальных и горизонтально-поперечных (боковых) сил в контакте колеса с рельсом при движении подвижного состава (ПС).

В разные годы изучению и созданию ТКП уделялось много внимания и за рубежом [1–6], и в нашей стране [7–10]. В настоящий момент в России зарегистрировано три реализации ТКП [11–13], для которых характерно размещение тензорезисторов с внутренней стороны дисков колес на двух concentрических окружностях, измеряющих радиальные деформации. Отличие между ними заключается только в количестве тензорезисторов на каждой окружности: по 4 тензорезистора через 90° , по 8 через 45° , либо по 16 через $22,5^\circ$.

Для данных реализаций ТКП проводилось мало исследований (особенно математического моделирования) по определению мест для расположения тензорезисторов с учетом действующих сил в зоне контакта колеса с рельсом. Кроме того, не решена задача выбора оптимального количества тензорезисторов, необходимых для непрерывной регистрации сил в зоне контакта колеса с рельсом.

В настоящей работе создана математическая модель ТКП в программном комплексе «Универсальный механизм» (ПК УМ). Для этого в ПК УМ, позволяющем проводить моделирование динамики железнодорожных экипажей с учетом упругости колесных пар, выполнено исследование напряженно-деформированного состояния диска колеса при различных вариантах его нагружения. Этот программный комплекс имеет значительные преимущества по сравнению с другими, так как входящие в него модули UM Loco, UM FEM и UM Flexible Wheel Set позволяют рассчитывать динамику

рельсового экипажа (РЭ) в полной пространственной постановке, в прямых и кривых участках пути с учетом и без учета неровностей путевой структуры [14–16].

Создание конечно-элементной упругой колесной пары

За основу модели ТКП взята реализация, при которой на внутренней части диска колеса на двух concentрических окружностях расположено по четыре тензорезистора через 90° , измеряющих радиальную деформацию (рис. 1).

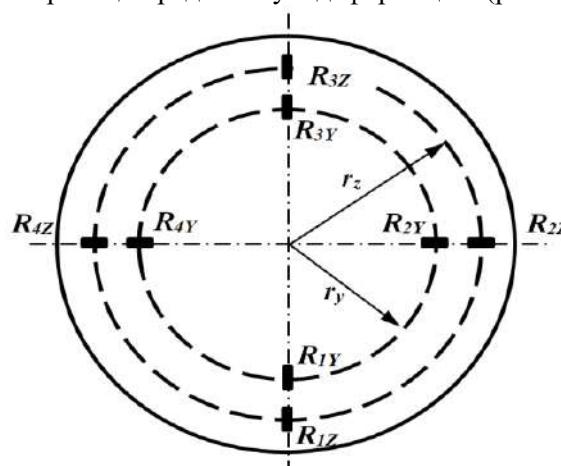


Рис. 1. Схема расположения тензорезисторов на колесе

Fig. 1. Scheme of location of strain gauges on the wheel

На concentрической окружности радиусом r_z располагаются тензорезисторы, на которые оказывается минимальное воздействие со стороны боковых сил, а на concentрической окружности радиусом r_y на тензорезисторы оказывается минимальное воздействие со стороны вертикальных сил. Пары диаметрально противоположных тензорезисторов на одной окружности ($R_{1Z}-R_{3Z}$, $R_{2Z}-R_{4Z}$, $R_{1Y}-R_{3Y}$, $R_{2Y}-R_{4Y}$) собирают-

ся в мостовые тензометрические схемы с двумя активными тензорезисторами [17].

Объектом исследования является колесная пара с цельнокатаным вагонным колесом с плоскоконическим диском [18]. С использованием пре- и постпроцессора MSC.Patran созданная конечно-элементная пространственная модель колесной пары из восьмиузловых объемных *hex*-элементов (рис. 2) была добавлена к модели цистерны на место первой колесной пары в первой тележке (рис. 3).

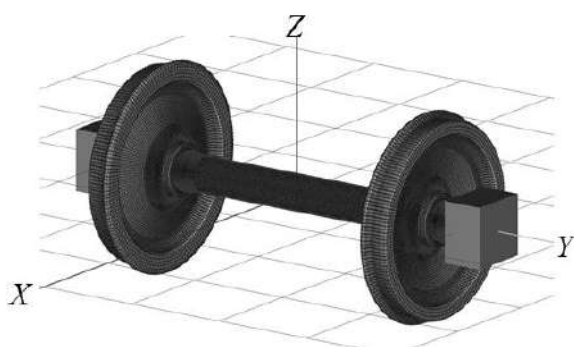


Рис. 2. Пространственная конечно-элементная модель колесной пары

Fig. 2. Spatial finite element wheel-set model

Компьютерная модель вагона-цистерны на двухосных тележках модели 18-100 построена с использованием подхода системы тел, в соответствии с которым механическая система представляется набором абсолютно твердых тел, связанных посредством шарниров и силовых элементов.

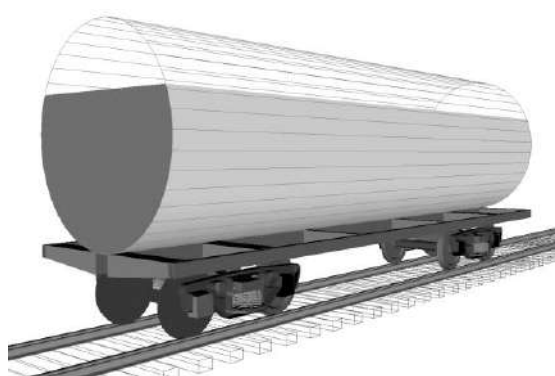


Рис. 3. Модель цистерны с упругой набегающей колесной парой

Fig. 3. Model of a tank with an elastic incoming wheel-set

Модель является параметризованной, допускает изменение геометрических и физиче-

ских параметров и может быть использована для исследования динамики вагона. При этом контактное взаимодействие тел осуществляется с помощью специальных силовых элементов, описывающих контакт отдельных точек одного тела с поверхностью другого.

В ПК УМ для расчета кинематики профиля и обобщенных сил, приложенных в произвольной точке поверхности качения колеса, предлагается использовать подходы Лагранжа либо Эйлера [16].

Подход Лагранжа заключается в том, что исследователь наблюдает за точками объекта, движущегося в пространстве. Это привычный для динамики систем тел метод, он применяется для вывода уравнений движения в ПК УМ. Основным результатом применения подхода Эйлера является неврашающаяся конечно-элементная сетка и, следовательно, возможность использовать заранее определенный набор узлов в одном сечении колеса для описания кинематики профиля и расчета обобщенных сил от контактных взаимодействий.

Во время исследования напряженно-деформированного состояния диска колеса при создании модели ТКП использовался привычный для динамики систем тел метод, т. е. подход Лагранжа.

В соответствии с этим подходом к упругой модели колесной пары были добавлены виртуальные тензорезисторы (ВТ) на внутренней поверхности диска правого колеса в узлах на радиусах 168–353 мм, расположенные в вертикальном сечении выше и ниже оси. Общее количество ВТ составило 52 шт. При этом для исследования напряжений ВТ в радиальном направлении в узлы введены начальные точки отсчета вспомогательных систем координат (СК) таким образом, чтобы радиальному направлению соответствовала ось *Z*, направленная от обода к оси вращения колеса, касательному направлению к окружности соответствовала ось *X*, а ось *Y* вспомогательной СК была бы перпендикулярна поверхности.

Определение мест расположения тензорезисторов

С учетом выбранной измерительной мостовой схемы для анализа напряженно-деформированного состояния колеса будем использовать разность радиальных напряжений диаметрально противоположных ВТ, располо-

женных на одинаковом радиусе концентрической окружности:

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3, \quad (1)$$

где σ_1 – радиальное напряжение, определяемое ВТ R_1 (ниже оси); σ_3 – радиальное напряжение, определяемое ВТ R_3 (выше оси).

При исследовании напряженно-деформированного состояния упругой колесной пары будем нагружать ее внешними активными T -силами в соответствии со схемой (рис. 4), где T_{ZL} – вертикальная активная сила на буксе левого колеса, T_{ZR} – вертикальная активная сила на буксе правого колеса.

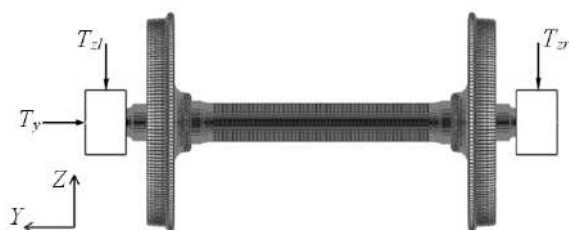


Рис. 4. Схема нагружения упругой колесной пары активными внешними силами:

T_{ZL} – вертикальная активная сила на буксе левого колеса; T_{ZR} – вертикальная активная сила на буксе правого колеса; T_Y – поперечная активная сила

Fig. 4. Loading scheme of an elastic wheelset active external forces:

T_{ZL} – vertical active force on the axle box of the left wheels; T_{ZR} – vertical active force on axle box right wheel; T_Y – transverse active force

В результате различных вариантов нагружения будут образовываться случаи одноточечного и двухточечного контактов, при которых в точках взаимодействия колеса с рельсом действуют нормальные N и касательные F силы (поперечные силы крипа) (рис. 5).

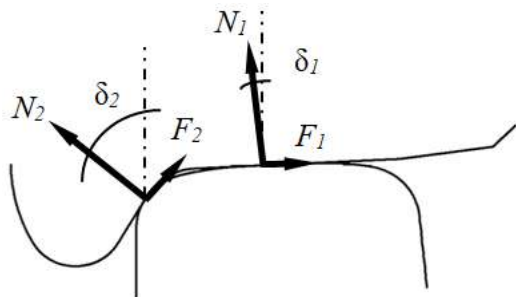


Рис. 5. Силы, действующие в точках контакта колеса с рельсом (двухточечный контакт)

Fig. 5. Forces acting at points of contact wheels with rail (point-to-point contact)

Боковая F_Y и вертикальная F_Z силы определяются согласно [14]:

$$F_Y = N_1 \cdot \sin(\delta_1) - F_1 \cdot \cos(\delta_1) + N_2 \cdot \sin(\delta_2) - F_2 \cdot \cos(\delta_2),$$

$$F_Z = N_1 \cdot \cos(\delta_1) + F_1 \cdot \sin(\delta_1) + N_2 \cdot \cos(\delta_2) + F_2 \cdot \sin(\delta_2).$$

Так как поиск радиусов концентрических окружностей проводится в состоянии покоя ($v = 0$ м/с), касательные силы равны нулю. Тогда:

$$F_Y = N_1 \cdot \sin(\delta_1) + N_2 \cdot \sin(\delta_2), \quad (1)$$

$$F_Z = N_1 \cdot \cos(\delta_1) + N_2 \cdot \cos(\delta_2). \quad (2)$$

Поиск радиуса концентрической окружности r_Y будем производить из условия наименьшего влияния на деформации от нормальной силы N_1 в первой точке контакта, а радиус концентрической окружности r_Z из условия наименьшего влияния на деформации от нормальной силы N_2 во второй точке контакта.

Задавая нагрузку с помощью сил T_{ZL} и T_{ZR} , будем изменять нормальную силу N_1 и определим радиус концентрической окружности r_Y , где влияние этой силы на разность радиальных напряжений $\Delta\sigma$ в узлах будет минимальным. Скорость движения вагона-цистерны при моделировании равна $v = 0$ м/с, а влияние будем рассматривать для пары ВТ R_1 – R_3 в вертикальном сечении (см. рис. 1). Расчетные варианты нагружения представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные варианты нагружения для определения радиуса концентрической окружности r_Y
Table 1. Calculated loading variants to determine the radius of a concentric circle r_Y

№	T_Y , кН	T_{ZL} , кН	T_{ZR} , кН
1		0	0
2		-10	-10
3		-20	-20
4		-30	-30
5		-40	-40
6		-50	-50
7		-60	-60
8		-70	-70
9		-80	-80
10		-90	-90

По результатам моделирования получены графики изменения разности радиальных напряжений $\Delta\sigma$ (рис. 6), анализ которых показывает, что наименьшее влияние на $\Delta\sigma$ происходит при расположении тензорезисторов на радиусе $r_Y = 321$ мм. Таким образом, для регистрации нормальной силы N_2 на этом радиусе концентрической окружности колеса

необходимо расположить пары виртуальных тензорезисторов $R_{1Y}-R_{3Y}$ и $R_{2Y}-R_{4Y}$.

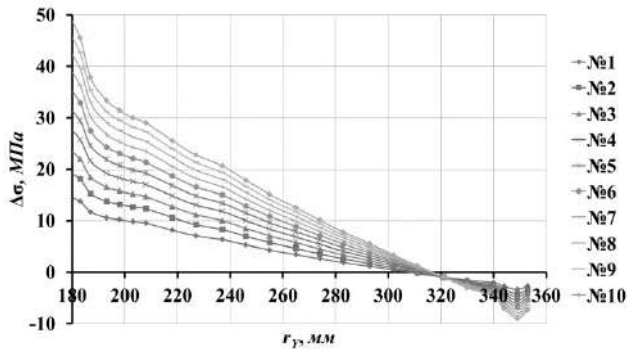


Рис. 6. Зависимость разности радиальных напряжений $\Delta\sigma$ на внутренней части диска колеса в вертикальном сечении от радиуса концентрической окружности при различных вариантах нагружения силами T_{ZL} и T_{ZR}

Fig. 6. Dependence of the difference in radial stresses $\Delta\sigma$ over the inner part of the wheel disk in a vertical section on the radius of the concentric circle under different loading options by forces T_{ZL} and T_{ZR}

Задавая нагрузку с помощью силы T_Y , будем изменять нормальную силу N_2 и определим радиус концентрической окружности r_Z , на котором влияние этой силы на разность радиальных напряжений $\Delta\sigma$ в узлах будет минимальным. Расчетные варианты нагружения представлены в табл. 2, а результаты расчетов – на рис. 7.

Таблица 2. Расчетные варианты нагружения для определения радиуса концентрической окружности r_Z

Table 2. Calculated load cases for determining the radius of a concentric circle r_Z

№	T_Y , кН	T_{ZL} , кН	T_{ZR} , кН
1	0	–	–
2	–10		
3	–20		
4	–30		
5	–40		
6	–50		
7	–60		
8	–70		
9	–80		
10	–90		

Анализ графиков рис. 7 показывает, что наименьшее влияние на разность радиальных напряжений $\Delta\sigma$ происходит при расположении

тензорезисторов на радиусе $r_Z = 340$ мм. Для регистрации нормальной силы N_1 на этом радиусе концентрической окружности колеса необходимо расположить пары ВТ $R_{1Z}-R_{3Z}$ и $R_{2Z}-R_{4Z}$.

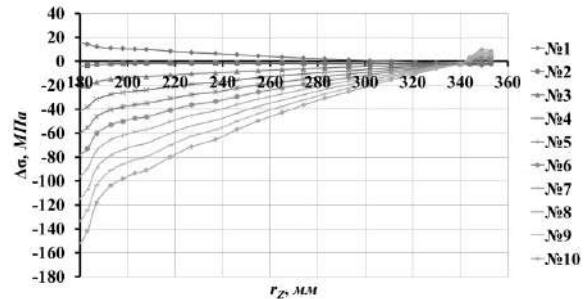


Рис. 7. Зависимость разности радиальных напряжений $\Delta\sigma$ на внутренней части диска колеса в вертикальном сечении от радиуса концентрической окружности

при различных вариантах нагружения силой T_Y

Fig. 7. The dependence of the difference of radial stresses $\Delta\sigma$ in the inner part of the wheel disk in the vertical section on the radius of the concentric circle under different variants of loading by force T_Y

Напряженно-деформированное состояние вращающегося колеса тензометрической колесной пары

Зная радиусы концентрических окружностей, добавим недостающие ВТ на диск правого колеса в горизонтальном сечении $R_{2Z}-R_{4Z}$ и $R_{2Y}-R_{4Y}$ и рассмотрим напряженно-деформированное состояние вращающегося колеса ТКП при движении модели вагона-цистерны со скоростью $v = 1$ м/с на прямом участке пути без неровностей. Разности радиальных напряжений будем рассматривать при разных подходах моделирования:

- подход Лагранжа (вращающаяся сетка);
- подход Эйлера (невращающаяся сетка).

По результатам моделирования получены графики разности радиальных напряжений для пар ВТ $R_{1Z}-R_{3Z}$ и $R_{2Z}-R_{4Z}$, расположенных на концентрической окружности радиусом $r_Z = 340,0$ мм, в зависимости от угла φ поворота колеса при постоянно действующей нормальной силе $N_1 = 113,1$ кН в контакте колеса с рельсом (рис. 8). Сигнал $\Delta\sigma_Z^{1-3}$, полученный с применением подхода Лагранжа от пары ВТ $R_{1Z}-R_{3Z}$, изменяется по закону косинуса, а сигнал $\Delta\sigma_Z^{2-4}$ от пары ВТ $R_{2Z}-R_{4Z}$ – по закону синуса. При этом, если мы рассмотрим сигнал $\Delta\sigma_Z^{1-3}$, полученный с применением подхода Эйлера, то увидим, что

он постоянен. Тогда зависимость разности радиальных напряжений тензорезисторов, расположенных на концентрической окружности r_z , от угла поворота колеса φ при постоянно действующей нормальной силе N_1 в зоне контакта колеса с рельсом можно представить в виде:

$$\Delta\sigma_z(\varphi) = \Delta\sigma_z^{1-3} \cdot \cos\varphi + \Delta\sigma_z^{2-4} \cdot \sin\varphi. \quad (3)$$

Аналогично ведут себя напряжения и при действии нормальной силы во второй точке контакта при постоянно действующей нормальной силе N_2 . Зависимость разности радиальных напряжений тензорезисторов, расположенных на концентрической окружности r_y от угла поворота колеса φ , можно представить следующим образом:

$$\Delta\sigma_y(\varphi) = \Delta\sigma_y^{1-3} \cdot \cos\varphi + \Delta\sigma_y^{2-4} \cdot \sin\varphi. \quad (4)$$

Для проверки выражений (3) и (4) рассмотрим движение модели вагона-цистерны с набегающей ТКП в прямом участке пути со скоростью $v = 16$ м/с по произвольным неровностям на правой и левой рельсовых нитях.

По результатам моделирования получены графики зависимости разности радиальных напряжений $\Delta\sigma$, рассчитанных с помощью подхода Лагранжа для пар ВТ $R_{1Z}-R_{3Z}$, $R_{2Z}-R_{4Z}$, $R_{1Y}-R_{3Y}$ и $R_{2Y}-R_{4Y}$, а также рассчитанных с помощью подхода Эйлера для пар ВТ $R_{1Z}-R_{3Z}$, $R_{1Y}-R_{3Y}$ от координаты пути x (рис. 9).

Аналогично представлены пересчитанные по формулам (3) и (4) зависимости от координаты пути x значений $\Delta\sigma_z$ и $\Delta\sigma_y$ (рис. 10).

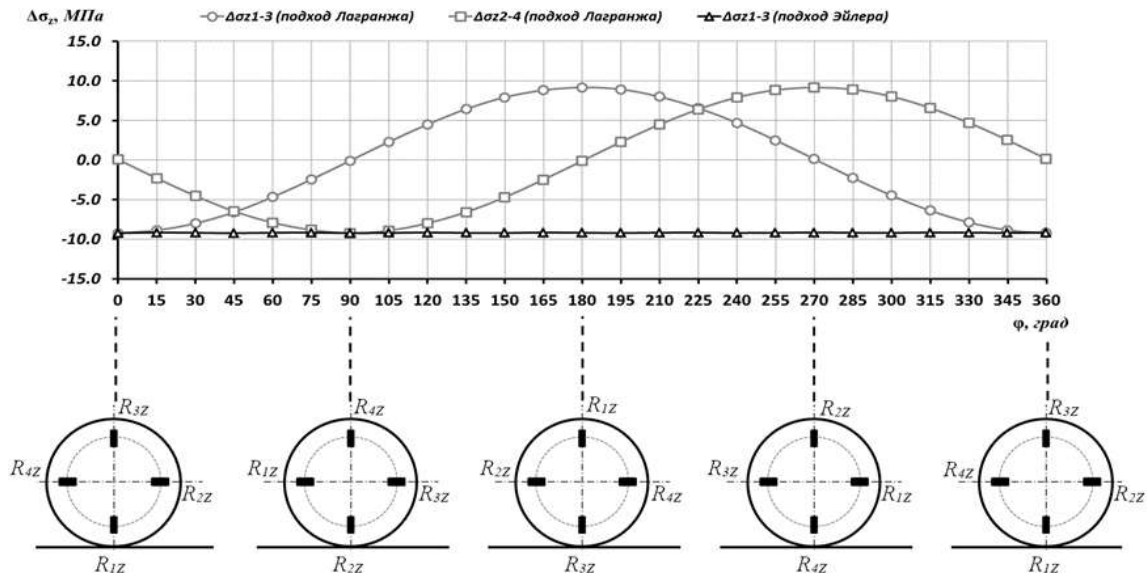
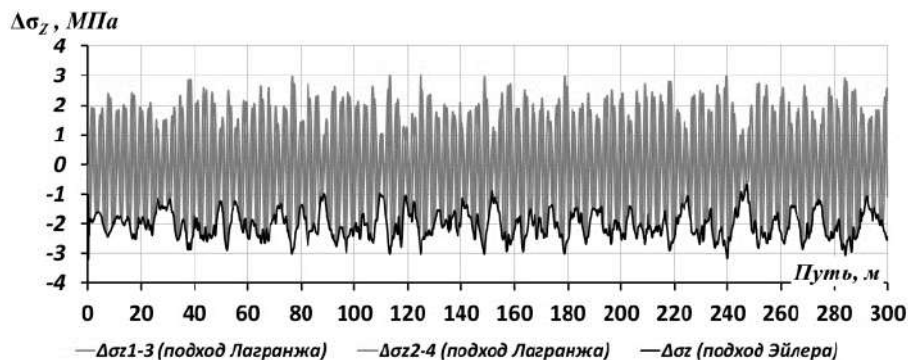


Рис. 8. Графики зависимости разности радиальных напряжений для пар виртуальных тензорезисторов $R_{1Z}-R_{3Z}$ и $R_{2Z}-R_{4Z}$ от угла φ поворота колеса (виртуальные тензорезисторы $R_{1Y}-R_{3Y}$ и $R_{2Y}-R_{4Y}$ на рисунке не показаны)

Fig. 8. Graphs of the dependence of the radial stresses' difference for pairs of virtual strain gauges $R_{1Z}-R_{3Z}$ and $R_{2Z}-R_{4Z}$ on the wheel rotation angle φ (virtual strain gauges $R_{1Y}-R_{3Y}$ and $R_{2Y}-R_{4Y}$ are not shown in the figure)



а

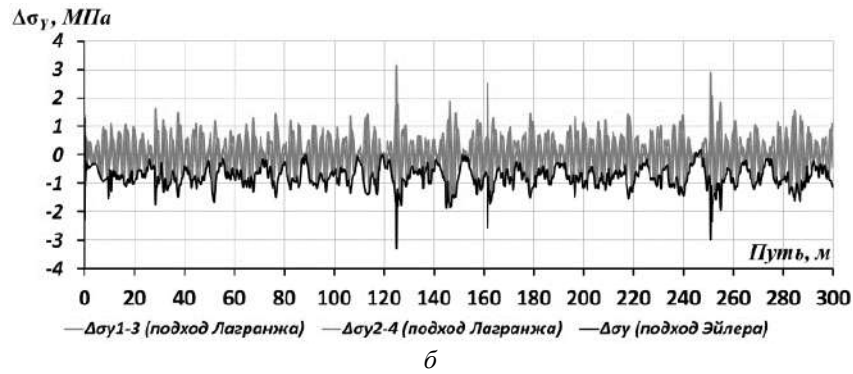
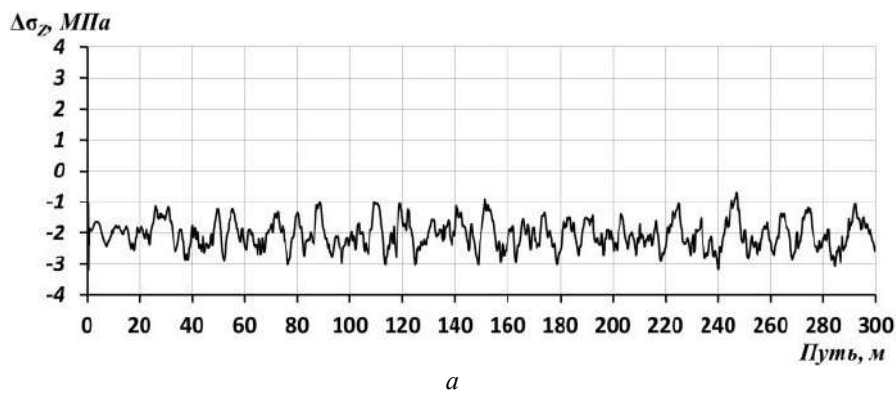


Рис. 9. Разность радиальных напряжений для пар виртуальных тензорезисторов:

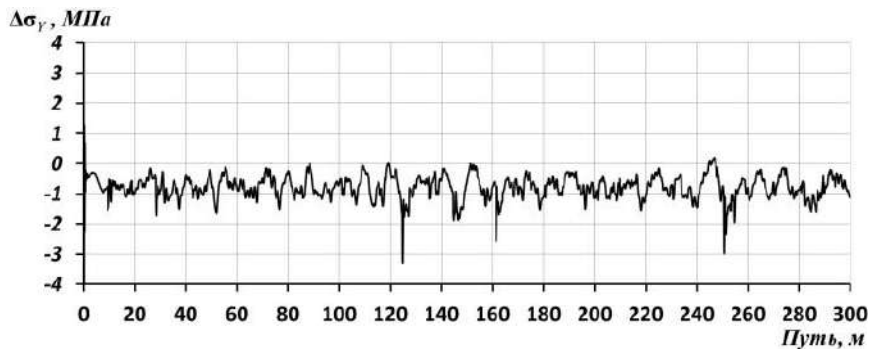
$a - R_{1Z} - R_{3Z}, R_{2Z} - R_{4Z}; \bar{b} - R_{1Y} - R_{3Y}, R_{2Y} - R_{4Y}$

Fig. 9. Radial stress difference for pairs of virtual strain gauges:

$a - R_{1Z} - R_{3Z}, R_{2Z} - R_{4Z}; \bar{b} - R_{1Y} - R_{3Y}, R_{2Y} - R_{4Y}$



a



\bar{b}

Рис. 10. Разность радиальных напряжений, рассчитанная по формулам (3) и (4)

для пар виртуальных тензорезисторов:

$a - R_{1Z} - R_{3Z}, R_{2Z} - R_{4Z}; \bar{b} - R_{1Y} - R_{3Y}, R_{2Y} - R_{4Y}$

Fig. 10. Radial stress difference calculated by formulas (3) and (4) for pairs of virtual strain gauges:

$a - R_{1Z} - R_{3Z}, R_{2Z} - R_{4Z}; \bar{b} - R_{1Y} - R_{3Y}, R_{2Y} - R_{4Y}$

Сравнение этих рисунков показывает полную сходимость результатов при использовании подхода Эйлера (невращающаяся сетка).

Таким образом, применяя по две пары диаметрально противоположных тензорезисторов на одной концентрической окружности, при использовании выражений (3) и (4) можно получить непрерывный сигнал разности ради-

альных напряжений $\Delta\sigma$, т. е. для оборудования ТКП необходимо всего 16 тензорезисторов.

Определение зависимости между показаниями виртуальных тензорезисторов и силами в точках контакта

Для определения зависимости между показаниями ВТ и силами в точках контакта

используем схему нагружения внешними силами (см. рис. 4). Для градуировки нормальной силы N_1 будем нагружать ТКП внешней силой T_Y , а для градуировки нормальной силы N_2 – внешними силами T_{ZL} и T_{ZR} . Значения внешних сил для градуировки представлены в табл. 3.

Таблица 3. Значения внешних сил для градуировки нормальных сил

Table 3. Values of external forces for grading Normal forces

№	Градуировка N_1	Градуировка N_2	
	T_Y , кН	T_{ZL} , кН	T_{ZR} , кН
1	0	0	0
2	-20	-20	-20
3	-40	-40	-40
4	-60	-60	-60
5	-80	-80	-80
6	-100	-100	-100

Определение зависимости между показателями проводилось при следующих условиях:

- скорость движения $v = 0$ м/с;
- ширина колеи $S = 1\,520$ мм;
- профиль рельса Р65 новый;
- подуклонка 1/20.

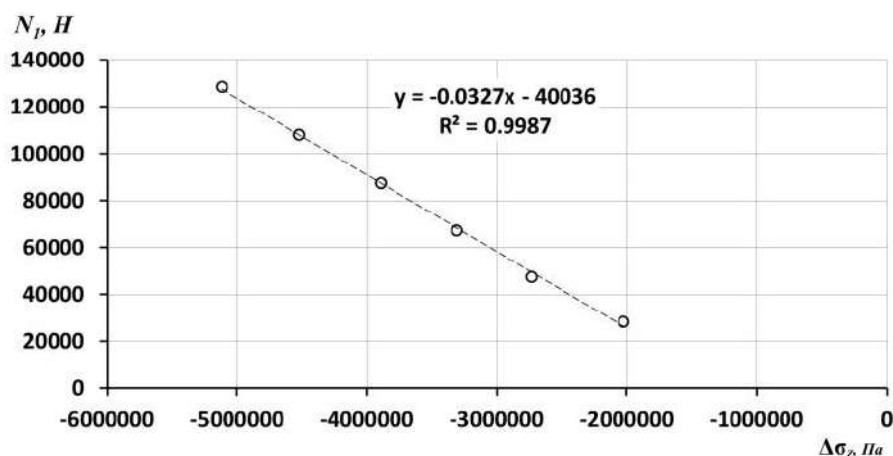
Результаты градуировки нормальной силы N_1 и разности напряжений $\Delta\sigma_Z$ (рис. 11, а), а также нормальной силы N_2 и разности напряжений $\Delta\sigma_Y$ (рис. 11, б) можно использовать для определения нормальных сил в точках контакта и для дальнейшего вычисления вертикальных и боковых сил по формулам (3) и (4).

Таким образом, для определения нормальных сил можно использовать следующие зависимости:

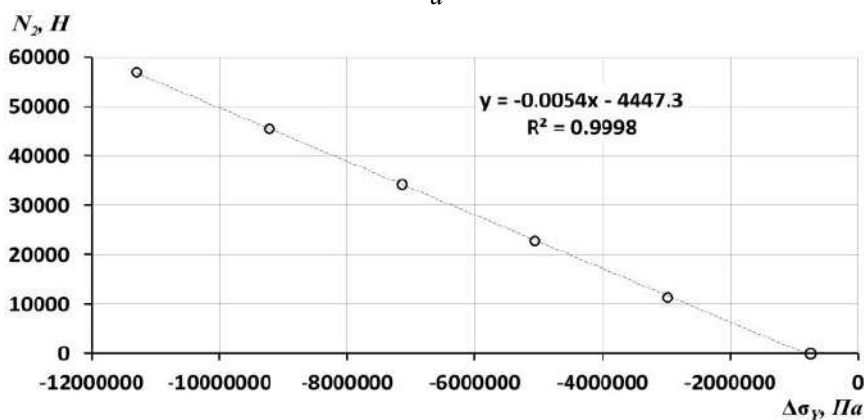
$$N_1 = -0,0327 \cdot \Delta\sigma_Z - 40\,036, \quad (5)$$

$$N_2 = -0,0054 \cdot \Delta\sigma_Y - 4\,447,3. \quad (6)$$

Для проверки полученных соотношений рассмотрим результаты моделирования движения со скоростью $v = 16$ м/с порожнего вагона-цистерны с набегающей ТКП на прямом участке пути по произвольным неровностям на правой и левой рельсовых нитях.



а



б

Рис. 11. Зависимость разности радиальных напряжений $\Delta\sigma_Z$ от нормальной силы N_1 (а) и N_2 (б)

Fig. 11. Dependence of the difference of radial stresses $\Delta\sigma_Z$ on the normal force N_1 (a) and N_2 (b)

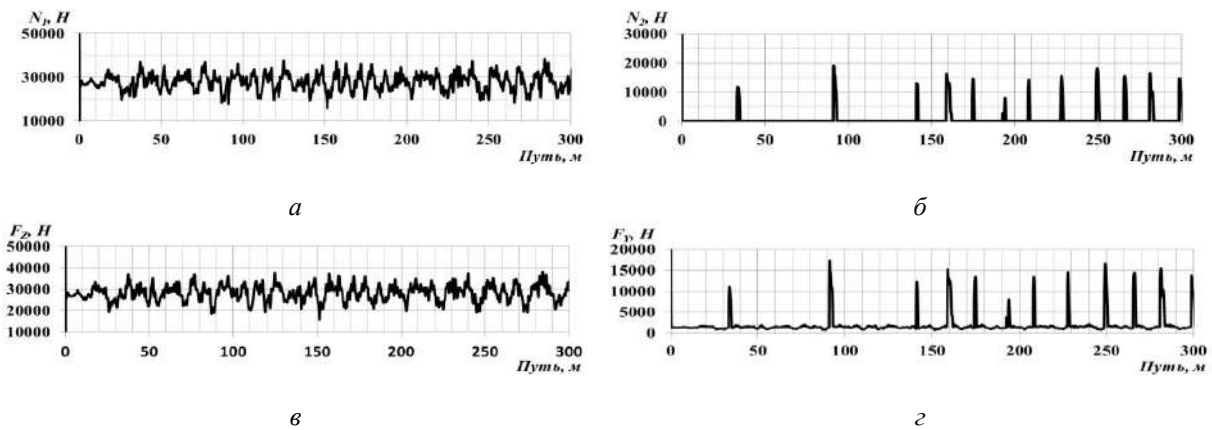


Рис. 12. Результаты моделирования, полученные путем расчета с использованием мастера переменных в программном комплексе «Универсальный механизм»:

a – нормальная сила N_1 в первой точке контакта; *б* – нормальная сила N_2 во второй точке контакта;
в – вертикальная сила F_Z ; *г* – боковая сила F_Y

Fig. 12. Simulation results obtained by calculation using the variable wizard in the program complex «Universal mechanism»:

a – normal force N_1 at the first point of contact; *b* – normal force N_2 at the second point of contact;
c – vertical force F_Z ; *d* – lateral force F_Y

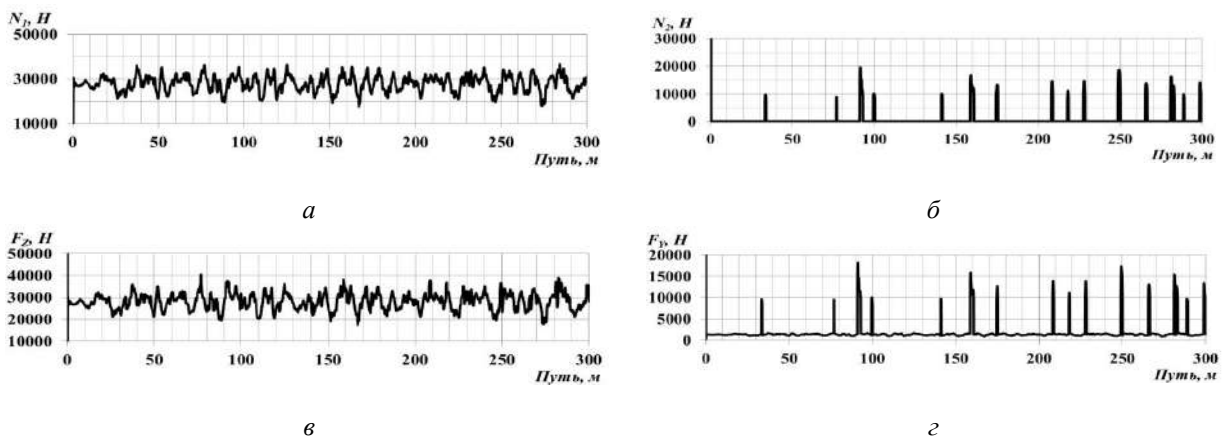


Рис. 13. Результаты моделирования, полученные при пересчете по формулам (1)–(3) с использованием данных виртуальных тензорезисторов:

a – нормальная сила N_1 в первой точке контакта; *б* – нормальная сила N_2 во второй точке контакта;
в – вертикальная сила F_Z ; *г* – боковая сила F_Y

Fig. 13. Simulation results obtained by recalculation according to formulas (1)–(3) using virtual strain gauge data

a – normal force N_1 at the first point of contact; *b* – normal force N_2 at the second point of contact;
c – vertical force F_Z ; *d* – lateral force F_Y

По результатам моделирования были построены графики зависимости нормальных сил N_1 и N_2 от координаты пути x (рис. 12), полученные в результате расчета с использованием мастера переменных в ПК УМ, а также боковой F_Y и вертикальной F_Z сил, определенных по формулам (1), (2). На рис. 13 представлены аналогичные характеристики, но там нормальные силы N_1 и N_2 определены через радиальные напряжения по выражениям (5) и (6).

Как видно из рисунков, результаты пока-

зывают достаточно удовлетворительную сходимость.

Заключение

Разработана конечно-элементная модель тензометрической колесной пары для исследования в ПК УМ.

Определены места расположения тензорезисторов для регистрации сил взаимодействия колеса с рельсом.

Проанализировано напряженно-деформированное состояние вращающегося колеса и определено оптимальное количество тензорезисторов для получения непрерывных сигналов сил в контакте колеса с рельсом.

Получены зависимости перехода от напряжений к силам в контакте колеса с рельсом, которые показали хорошую сходимость с силами, рассчитанными в ПК УМ.

Список литературы

1. Konishi S., Nakamura H. An Example of the measured loads on the wheel set // Bulletin of the JSME. 1959. Vol. 2 (8). Pp. 526–532.
2. Konishi S. Measurement of loads on wheel set // Transaction of the JSME. 1967. Vol. 8. № 3. Pp. 26–29.
3. Prigge Braunschweig W. Die Beanspruchung einer einfachgewellten Eisenbahnradzscheibe. Ermittlung der Spannungen durch spannungsoptische Verfahren // Glasers annalen. 1959. Vol. 83 (4). Pp. 132–136.
4. Olson P.E., Johnsson S. Seitenkrafte zwischen Rad und schiene // Glasers annalen. 1959. № 5. Pp. 153–161.
5. Weber H.H. Zur direkten Messung der Krafte zwischen Rad und Schiene // Elektrische Bahnen. 1961. № 5. Pp. 93–110.
6. Измерение геометрии пути с учетом характеристик подвижного состава // Железные дороги мира. 2007. № 8. С. 74–77.
7. Шафрановский А.К. Непрерывная регистрация вертикальных и боковых сил взаимодействия колеса и рельса. М. : Транспорт, 1965. 96 с.
8. Шафрановский А.К. Измерения и непрерывная регистрация сил взаимодействия колесных пар локомотивов с рельсами. М. : Транспорт, 1969. 120 с.
9. Сасковец В.М. Измерение вертикальных и горизонтальных сил, действующих на колесную пару вагона // Сборник трудов ВНИИЖТ. 1977. № 572. С. 28–36.
10. Коваль В.А., Кажаяев А.Н. Метод измерения динамических сил с большой дискретизацией по длине пути с помощью тензометрической колесной пары // Решение задач взаимодействия подвижного состава и пути реального очертания : сб. науч. тр. М. : Транспорт 1985. С. 49–57.
11. Пат. 2441206 Рос. Федерация. Устройство для измерения вертикальных и боковых сил взаимодействия между колесом и рельсом / О.Г. Краснов, А.Л. Бидуля, В.С. Коссов и др. № 2010144830/28 ; заявл. 02.11.2010 ; опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3. 7 с.
12. Пат. 2591739 Рос. Федерация. Устройство для измерения вертикальных и боковых сил взаимодействия между колесом и рельсом / А.Я. Коган, О.А. Суслов, А.Н. Кажаяев. № 2015116322/28 ; заявл. 29.04.2015 ; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20. 15 с.
13. Пат. 2682567 Рос. Федерация. Устройство сбора информации и способ оценки результатов взаимодействия между колесом и рельсом / А.В. Третьяков, К.В. Елисеев, М.В. Зимакова и др. № 2017143085 ; заявл. 08.12.2017 ; опубл. 19.03.2019, Бюл. № 8. 13 с.
14. Моделирование динамики железнодорожных экипажей : руководство пользователя // Universal mechanism : сайт. URL: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/08_um_loco.pdf (Дата обращения 18.10.2022).
15. Моделирование упругих тел : руководство пользователя // Universal mechanism : сайт. URL: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/11_um_fem.pdf (Дата обращения 18.10.2022).
16. Моделирование динамики железнодорожных экипажей с учетом упругости колесных пар : руководство пользователя // Universal mechanism : сайт. URL: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/28_um_flexible_wheelset.pdf (Дата обращения 18.10.2022).
17. Тензометрия в машиностроении / Р.А. Макаров, А.Б. Ренский, Г.Х. Боркунский и др. М. : Машиностроение, 1975. 287 с.
18. ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. Введ. 2012–01–01. М. : Стандартинформ, 2011. 49 с.

References

1. Konishi S., Nakamura H. An Example of the measured loads on the wheel set. Bulletin of the JSME, 1959, vol. 2 (8), pp. 526–532.
2. Konishi S. Measurement of loads on wheel set. Transaction of the JSME, 1967, vol. 8, no. 3, pp. 26–29.
3. Prigge Braunschweig W. Die Beanspruchung einer einfachgewellten Eisenbahnradzscheibe. Ermittlung der Spannungen durch spannungsoptische Verfahren. Glasers annalen, 1959, vol. 83 (4), pp. 132–136.
4. Olson P.E., Johnsson S. Seitenkrafte zwischen Rad und schiene. Glasers annalen, 1959, no. 5, pp. 153–161.
5. Weber H.H. Zur direkten Messung der Krafte zwischen Rad und Schiene. Elektrische Bahnen, 1961, no. 5, pp. 93–110.
6. Izmereniye geometrii puti s uchetom kharakteristik podvizhnogo sostava [Measuring track geometry taking into account rolling stock characteristics]. *Zheleznyye dorogi mira* [Railways of world], 2007, no. 8, pp. 74–77.
7. Shafranovskii A.K. Nepreryvnaya registratsiya vertikal'nykh i bokovykh sil vzaimodeystviya koleasa i rel'sa [Continuous recording of vertical and lateral wheel-rail interaction forces]. Moscow: Transport, 1965. 96 p.
8. Shafranovskii A.K. Izmereniya i nepreryvnaya registratsiya sil vzaimodeystviya kolesnykh par lokomotivov s rel'sami [Measurements and continuous recording of interaction forces between locomotive wheelsets and rails]. Moscow: Transport, 1969. 120 p.
9. Saskovets V.M. Izmereniye vertikal'nykh i gorizontal'nykh sil, deistvuyushchikh na kolesnuyu paru vagona [Measurement of vertical and horizontal forces acting on a wagon wheelset]. *Trudy VNIIZHT* [Proceedings of the All-Union Science-Research Institute of Railway], 1977, no. 572, pp. 28–36.
10. Koval' V.A., Kazhaev A.N. Metod izmereniya dinamicheskikh sil s bol'shoi diskretizatsiei po dline puti s pomoshch'yu tenzometricheskoi kolesnoi pary [Method to measure dynamic forces with a large discretization along the track length using a strain-

gauge wheel set]. *Sbornik nauchnykh trudov «Reshenie zadach vzaimodeistviya podvizhnogo sostava i puti real'nogo ochertaniya»* [Proceedings «Solving the problems of interaction of rolling stock and actual configuration track»]. Moscow, 1985, pp. 49–57.

11. Krasnov O.G., Bidulya A.L., Kossov V.S., Astanin N.N. Patent RU 2441206 C1, 27.01.2012.

12. Kogan A.Ya., Suslov O.A., A.N. Kazhaev. Patent Ru 2591739 C1, 20.07.2016.

13. Tret'yakov A.V., Eliseev K.V., Zimakova M.V., Petrov A.A., Kozlov P.V. Patent RU 2682567 C1, 19.03.2019.

14. Rukovodstvo pol'zovatelya «Modelirovanie dinamiki zheleznodorozhnykh ekipazhei» [User guide «Simulation of the dynamics of railway vehicles»]. Available at: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/08_um_loco.pdf (Accessed October 18, 2022).

15. Rukovodstvo pol'zovatelya «Modelirovanie uprugikh tel» [User guide «Simulation of elastic bodies»]. Available at: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/11_um_fem.pdf (Accessed October 18, 2022).

16. Rukovodstvo pol'zovatelya «Modelirovanie dinamiki zheleznodorozhnykh ekipazhei s uchedom uprugosti kolesnykh par» [User guide «Simulation of the dynamics of railway vehicles, taking into account the elasticity of wheel sets»]. Available at: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/28_um_flexible_wheelset.pdf (Accessed October 18, 2022).

17. Makarov R.A., Renskii A.B., Borkunskii G.Kh., Etingof M.I. *Tenzometriya v mashinostroenii* [Strain-gauging in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975. 287 p.

18. GOST 10791-2011. *Kolesa tsel'nokatanye. Tekhnicheskie usloviya* [State standard 10791-2011. Solid-rolled wheels. Technical specification]. Moscow: Standartinform Publ., 2011. 49 p.

Информация об авторах

Акашев Михаил Геннадьевич, аспирант кафедры электропоездов и локомотивов, Российский университет транспорта, г. Москва; ведущий инженер отдела пути и специального подвижного состава, Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, г. Коломна; e-mail: akashev-mg@vnikti.com.

Савоськин Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электропоездов и локомотивов, Российский университет транспорта, г. Москва; e-mail: elmechtrans@mail.ru.

Чунин Виталий Владимирович, заведующий лабораторией колесных пар отдела прочности, Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, г. Коломна; e-mail: chunin-vv@vnikti.com.

Information about the authors

Mikhail G. Akashev, Ph.D. student of the Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport, Moscow; leading Engineer of the Department of Track and Special Rolling Stock, Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock, Kolomna; e-mail: akashev-mg@vnikti.com.

Anatolii N. Savos'kin, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport, Moscow; e-mail: elmechtrans@mail.ru.

Vitalii V. Chunin, Head of Wheel set Laboratory of the Department of Strength, Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock, Kolomna; e-mail: chunin-vv@vnikti.com.

О применении комплекса автоматизированного управления движением поездов в условиях высокой интенсивности движения

М.И. Зелова, А.В. Комаров✉

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

✉ak38uer@gmail.com

Резюме

В сфере железнодорожного транспорта планомерно осуществляется переход на высокотехнологичные средства организации и выполнения работ по основным направлениям деятельности с применением цифровых технологий, что в целом обозначается понятием «цифровая трансформация». В свете функционирования системы управления инновациями на региональном уровне необходимо отметить создание в 2021 г. сети региональных центров инновационного развития железных дорог как в статусе филиалов ОАО «Российские железные дороги», задачами которых являются поддержка и развитие инновационной деятельности на всем пространстве железнодорожного транспорта России. В направлении автоматизации эксплуатационной работы в 2014 г. на действующей двухпутной линии Северо-Кавказской железной дороги построен и применен аппаратно-программный комплекс автоматизированного управления движением поездов. Обозначенный комплекс является одним из компонентов интеллектуальной системы управления на железнодорожном транспорте, обеспечивающей повышение эффективности эксплуатационной работы, в частности управления движением поездов со стороны поездного диспетчера. В статье рассмотрены перспективы применения современных интеллектуальных разработок как на однопутных, так и на двухпутных участках в условиях повышения интенсивности движения, что нередко сопровождается возникновением нестандартных ситуаций, примеры которых показаны применительно к построению маршрутов следования поездов на реальном однопутном перегоне. В качестве перспективного полигона для внедрения автоматизированного комплекса рассмотрен однопутный участок с дизельной тягой Улан-Удэ – Наушки Восточно-Сибирской железной дороги, где для модернизации предложен наименее технически оснащенный отрезок, ограниченный станциями Медведчиково и Сульфат, включающий семь перегонов общей протяженностью 95 км.

Ключевые слова

автоматизация эксплуатационной работы, цифровая трансформация, график движения поездов, железнодорожный транспорт, аппаратно-программный комплекс, перевозочный процесс, управление движением поездов

Для цитирования

Зелова М.И. О применении комплекса автоматизированного управления движением поездов в условиях высокой интенсивности движения / М.И. Зелова, А.В. Комаров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 92–100. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).92-100.

Информация о статье

поступила в редакцию: 19.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 21.12.2022 г.; принята к публикации: 22.12.2022 г.

On the application of an automated train traffic control complex under high traffic intensity

M.I. Zelova, A.V. Komarov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ak38uer@gmail.com

Abstract

In railway transport, the transition to high-tech means of organizing and performing work in the main areas of activity using digital technologies is systematically carried out, which is generally denoted by the concept of «digital transformation». In the light of the functioning of the innovation management system at the regional level, it is necessary to note the creation in 2021 of a network of regional centers for innovative development of railways in the status of Russian Railways branches, whose tasks are to support and develop innovative activities throughout the Russian railway transport. Acting towards the automation of operational work in 2014 on the existing double-track line of the North-Caucasian railway a hardware-software complex for automated train traffic control was built and applied. The aforementioned complex is one of the components of an intelligent control system in railway transport ensuring an increase in the efficiency of operational work, in particular, train traffic control by a train dispatcher. The article discusses the prospects for the use of modern intellectual developments both on single-track and double-track sections under the conditions of increased traffic intensity, which is often accompanied by the occurrence of non-standard situations, whose examples are shown in relation to the construction of train routes on a real single-track section. As a promising test site for the introduction of an automated complex, a single-track section with diesel traction Ulan-Ude–Naushki of an East-

Siberian railway is considered, where the least technically equipped section, limited by Medvedchikovo and Sulfat stations, including 7 hauls total length of 95 km, was proposed as a starting point for the modernization of the landfill.

Keywords

automation of operational work, digital transformation, train schedule, railway transport, hardware and software complex, transportation process, train traffic management

For citation

Zelova M.I., Komarov A.V. O primeneni kompleksa avtomatizirovannogo upravleniya dvizheniem poezdov v usloviyakh vysokoi intensivnosti dvizheniya [On the application of an automated train traffic control complex under high traffic intensity]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 92–100. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).92-100.

Article info

Received: October 19, 2022; Received: December 21, 2022; Accepted: December 22, 2022.

Введение

Существующие цифровые технологии активно развиваются, трансформируются и внедряются во все сферы деятельности, периодически реагируя на достижения научно-технического прогресса [1]. В Стратегии развития железнодорожного транспорта Российской Федерации ключевое значение отводится решению задач, которые должны быть реализованы на базе использования технических и технологических свершений [2]. Инновационная деятельность ОАО «РЖД» и его дочерних зависимых обществ способствует повышению эффективности экономики холдинга. В настоящее время одной из динамично развивающихся интеллектуальных разработок, связанных с безопасностью движения, является аппаратно-программный комплекс автоматизированного управления движением поездов (АПК АУД). В обозначенном контексте под *комплексом* подразумеваются функционально связанных средства технологического оснащения полигона для выполнения заданных операций или функций в условиях высокой интенсивности движения. Целью разработки технологий автоматизированного управления движением поездов является улучшение показателей эксплуатационной работы: повышение качества выполнения графика движения поездов, повышение маршрутной скорости, общее снижение эксплуатационных затрат при организации поездной работы на базе вариантного графика и др.

Состав комплекса автоматизированного управления движением поездов

Используемые в настоящее время автоматизированные системы управления сложными технико-технологическими объектами же-

лезнодорожного транспорта позволяют контролировать многие процессы автоматически без участия лица, принимающего решения напрямую, а также удаленно – с участием оператора дистанционного управления поездами [3].

Одним из компонентов интеллектуальной системы управления на железнодорожном транспорте можно считать АПК АУД, объединяющей в себе технологические и обеспечивающие элементы. В нем применяются технологии на основе моделирования, использования накопленных знаний специалистов. Ядром АПК АУД служат методы искусственного интеллекта, обеспечивая выполнение частных технологических процессов управления перевозками на трех уровнях [4]. Высшим уровнем, обозначенным на рис. 1 символом «I», является планирование работы полигона, осуществляемой в диспетчерском центре.

В термин «план» попадают графики движения разного временного интервала. Средний (он же административный) уровень, имеющий обозначение «II», сочетает в себе управление пропуском поездов на участке, координацию *автоматической* работы локомотивов. Управление железнодорожными транспортными средствами в данном комплексе наиболее соответствует технологиям четвертого уровня автоматизации [5, 6]. Аппаратный уровень «III» – обеспечение интервального регулирования движения поездов и управление стрелками и сигналами на станциях.

Таким образом, можно дать следующее определение: «Аппаратно-программный комплекс автоматизированного управления движением поездов – это совокупность средств технического оснащения при интенсивном потоке движения, интегрирующая современные циф-

ровые технологии и действующие информационно-управляющие системы ОАО «РЖД», обеспечивающая автоматизированную разработку и принятие к реализации рациональных сценариев управления движением, выгодных всем участникам перевозочного процесса, с целью обеспечения нормативного графика движения поездов, эффективного использования подвижного состава и повышения надежности транспортного процесса на железнодорожном транспорте».

Разработанный АПК базируется на *принципах иерархичности* составляющих элементов комплекса [7]. Так, рациональные и эффективные решения на нижних иерархических уровнях не достигнут поставленной задачи, если на более высоком уровне были совершены «промахи». Отсюда вытекает, что должны быть четко обозначены границы уровней и соблюдена иерархия сверху вниз, а также правильно рассчитан баланс эксплуатационных расходов и содержания ресурсов, способных обеспечить наибольший вагонопоток на участке.

Рассматриваемый программный комплекс успешно реализован на полигоне Сочи – Адлер – Роза-Хутор протяженностью около 80

км (Северо-Кавказская железная дорога) незадолго до открытия Олимпийских игр 2014 г. в Сочи. Доля работы в автоматическом управлении при использовании технологии составляет порядка 88 %. Всего проследовало свыше 11,7 тыс. пригородных электропоездов «Ласточка», перевезено 4,8 млн пассажиров. Выполнение графика составило порядка 99 % [6].

Для достижения баланса в управлении перевозочным процессом комплекс подчинен *единой (интегрированной) основе*, в которой объединены средства цифровой связи GSM-R, спутниковая навигация ГЛОНАСС, подсистемы «Автодиспетчер», «Автомашинист», системы железнодорожной автоматики и телемеханики, центр управления движением АСУ-Д, локомотивный комплекс безопасности. С помощью АПК АУД:

- осуществляется автоматизированное управление движением поездов как на однопутных участках, так и на участках с двухпутными вставками по нормативному графику;
- ведется автоматизированный расчет, а при наличии конфликтных ситуаций оперативно разрабатывается вариантный график движения («Автодиспетчер»);
- передаются на электроподвижной состав

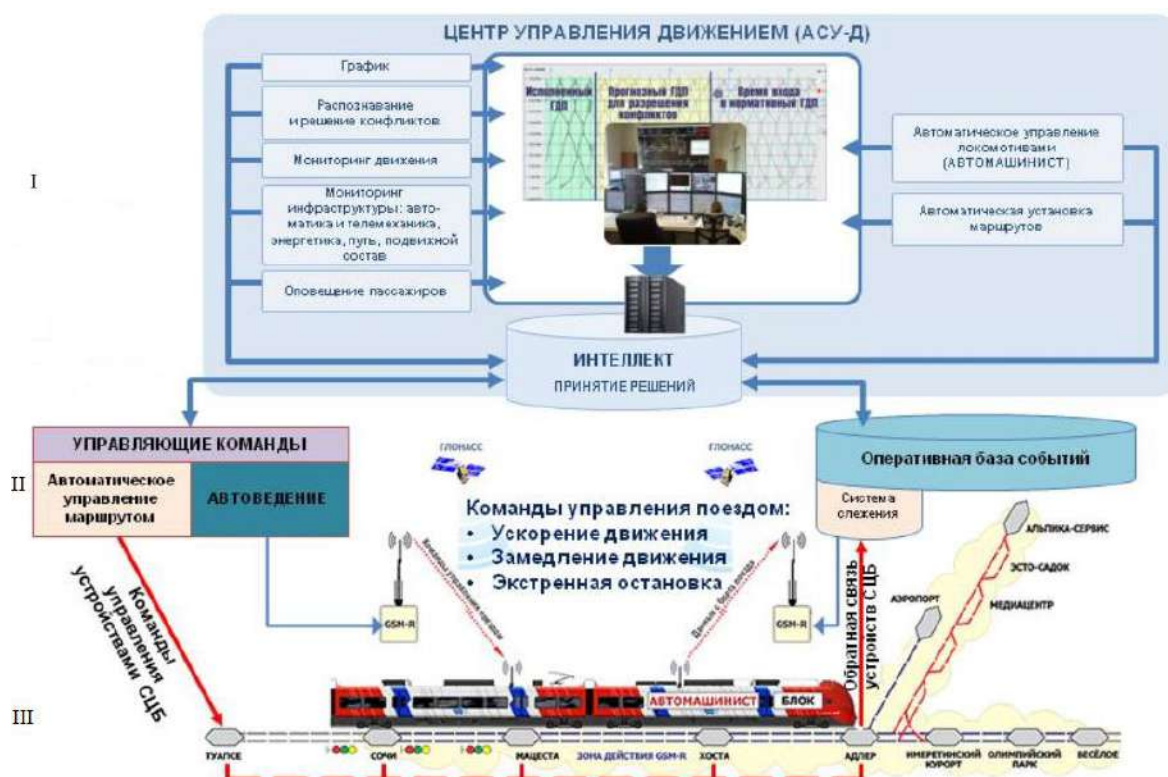


Рис. 1. Уровни аппаратно-программного комплекса автоматизированного управления движением поездов

Fig. 1. Levels of the hardware-software complex of automated train traffic control

управляющие команды («Автомашинист») и данные о корректировке графика движения по беспроводному каналу;

– контролируется движение поезда в реальном времени на основе спутниковой навигации [8, 9].

Установка нестандартных маршрутов на станциях однопутного участка

В реальной поездной обстановке в ходе эксплуатации системы возникают ситуации, требующие особого внимания поездного диспетчера [10, 11], например, при обыкновенном скрещении двух поездов одной грузовой категории, прибывающих к станции примерно в одно время. Первый приближающийся к станции нечетный поезд № 2009 встает на боковой третий путь, встречный четный поезд № 2002 проследует по главному первому пути (рис. 2).

В данном случае заранее не определено, какой из двух поездов принять на боковой путь [12].

Аналогичная ситуация с двойным скрещением изображена на рис. 3. Первый приближающийся к станции четный поезд № 2002 встает на боковой третий путь, встречные поезда № 2009 и № 2011 проследуют по главному пер-

вому пути.

Не исключен вариант развязки, когда поезд № 2002 принимают на боковой третий путь, затем поезд № 2001 встает на второй путь для пропуска скорого пассажирского поезда № 101 по главному пути для исключения задержки у входного сигнала Н (рис. 4).

При подходе с обеих сторон на разъезд встречных длинносоставных поездов необходимо будет принять решение о задержке одного из поездов на приемоотправочном пути станции, пока встречный не проследует и разъезд, и станцию.

Рассмотрим ситуацию, похожую на ту, что показана на рис. 4, с точки зрения изменения одного из показателей эксплуатационной работы – участковой скорости. Система запланировала обгон, опираясь на встроенные нормативы, на разъезде № 2 (рис. 5). Однако поездной диспетчер предпочтет более надежное и безопасное решение: более ранний обгон на разъезде № 1 (рис. 6). Несмотря на то, что участковая скорость грузового поезда несколько снизится, действия диспетчера будут вполне оправданы, иначе нагон поезда № 2001 может под влиянием ситуативных факторов произойти чуть быстрее, что приведет к задержке скорого поезда.

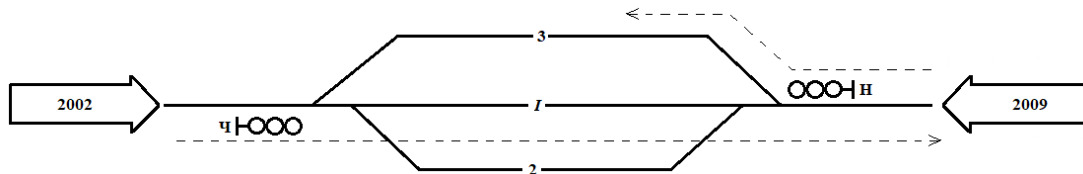


Рис. 2. Обыкновенное скрещение поездов
Fig. 2. An ordinary train crossing

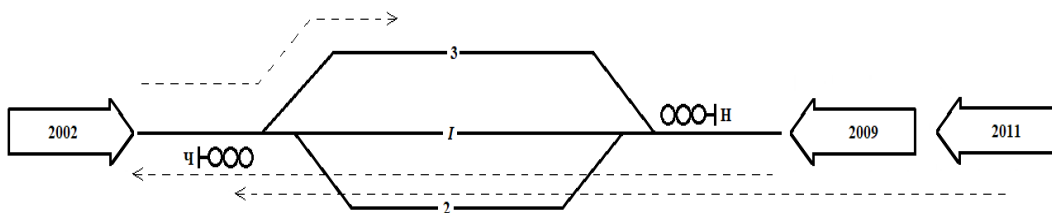


Рис. 3. Двойное скрещение поездов
Fig. 3. Double train crossing

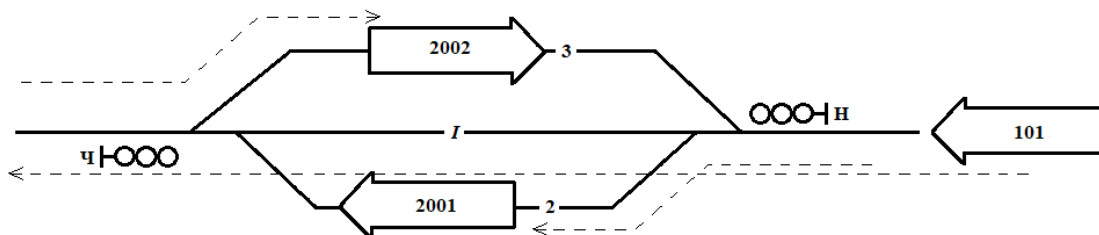


Рис. 4. Двойное скрещение с обгоном
Fig. 4. Double crossing with overtaking

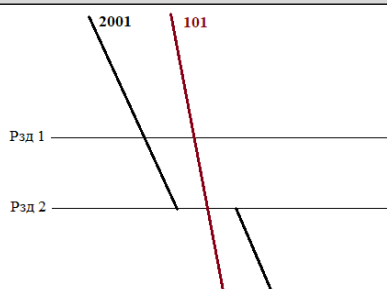


Рис. 5. Предложенное решение аппаратно-программного комплекса
Fig. 5. The proposed solution of the hardware and software complex

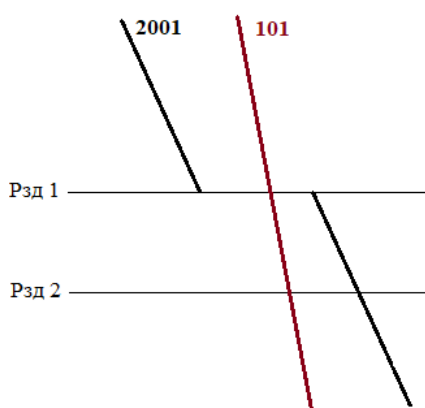


Рис. 6. Решение поездного диспетчера
Fig. 6. Train Dispatcher's Decision

Подобные ситуации могут возникать при достаточно высокой интенсивности движения, при том реализовать их в АПК АУД не составляет особых затруднений. В режиме «Автодиспетчер» диспетчеру известна очередность команд на установку маршрутов, которую программа собирается применить [13, 14]. С другой стороны, уверенность в автоматическом изменении команд непосредственно перед их исполнением снижается, так как нет гарантии, что видоизмененные действия будут отражать действительность. Следовательно, человеческий контроль полностью исключить пока невозможно [15].

Перспективы внедрения аппаратно-программного комплекса автоматизированного управления движением поездов на однопутном участке

Однопутный участок Улан-Удэ – Наушки Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД) (рис. 7) заслуживает особого внимания при внедрении различного рода автоматизированных систем из-за ожидаемого в ближайшее время увеличения товаропотоков

на восточном направлении, в первую очередь по межгосударственным сухопутным переходам с Монголией и Китаем.

Как следствие, повышение интенсивности движения приведет к увеличению нагрузки на диспетчерский персонал, часть которой может взять на себя автоматизация управления движением.

Обозначенный участок, протяженность которого составляет 255,6 км, соединяет Транссибирскую магистраль и Улан-Баторскую железную дорогу МНР. Станции Улан-Удэ и Наушки, ограничивающие участок, являются участковыми, по объему и сложности работ относятся к первому классу. Станция Улан-Удэ включена в диспетчерскую централизацию секции Суховская – Заудинский, ст. Наушки – отдельной секции Заудинский – Дозорный. На всем протяжении участка Улан-Удэ – Наушки применяется дизельная тяга, реализуемая тепловозами серий 3ТЭ10, 2ТЭ10, 2ТЭ116. Размеры движения в четном и нечетном направлении одинаковы и составляют пять пар пассажирских и пять пар грузовых поездов в сутки.

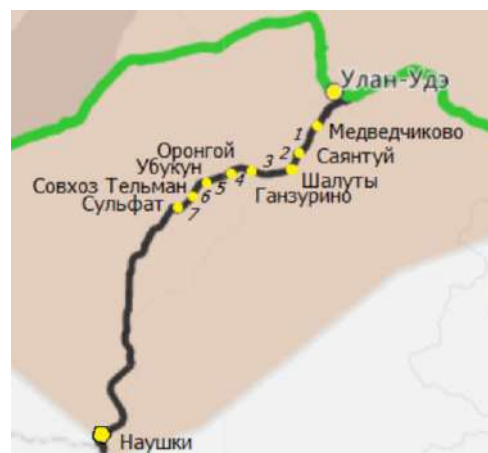


Рис. 7. Участок Улан-Удэ – Наушки
Fig. 7. Ulan-Ude – Naushki section

В настоящем исследовании в качестве стартового полигона для модернизации путем внедрения автоматизированного комплекса управления движением предложен наименее технически оснащенный отрезок рассматриваемого участка, ограниченный ст. Медведчиково и ст. Сульфат, включающий семь перегонов общей протяженностью 95 км (позиции 1–7 на рис. 7), обеспечивающий движение грузовых и пассажирских поездов в направлении пограничной ст. Наушки. Все станции выделенного отрезка

являются промежуточными станциями V класса, за исключением ст. Медведчиково (класс IV), основные характеристики перегонов и станций, их ограничивающих, представлены в табл.

Применение инновационных разработок в области автоматизации управления перевозочным процессом позволит увеличить про-

пускную способность линии за счет повышения технологичности управления: сокращение простоев под скрещением и времени исполнения других технологических интервалов, оптимизация скоростных режимов движения, реализация пакетных графиков движения с применением системы «активный хвост» и т. п.

Характеристика перегонов и станций
Characteristics of railway spans and stations

№ п/п	Перегон Railway span	Коды единой сетевой разметки станций Codes of a single network markup of stations	Протяженность перегона, км Haul length, km	Операции, производимые станциями, ограничивающими перегон Operations per-formed by stations limiting the haul
1	Медведчиково – Саянтуй Medvedchikovo – Sayantui	93580–93590	15	<i>Медведчиково</i> : прием и выдача грузов повагонными отправлениями, загружаемых целыми вагонами, только на подъездных путях и местах необщего пользования; посадка и высадка пассажиров на (из) поезда пригородного и местного сообщения. <i>Medvedchikovo</i> : acceptance and delivery of goods by wagon shipments, loaded by whole wagons, only on sidings and non-public areas; embarkation and disembarkation of passengers on (from) suburban and local trains. <i>Саянтуй</i> : прием и выдача повагонных отправок грузов, допускаемых к хранению на открытых площадках станций; продажа билетов на все пассажирские поезда <i>Sayantui</i> : acceptance and issuance of carload shipments of goods allowed for storage in stations open areas; sale of tickets for all passenger trains
2	Саянтуй – Шалуты Sayantui – Shaluty	93590–93560	9	<i>Шалуты</i> : то же, что и на станции Медведчиково <i>Shaluty</i> : same as at Medvedchikovo station
3	Шалуты – Ганзурино Shaluty – Ganzurino	93560–93598	20	<i>Ганзурино</i> : продажа билетов на все пассажирские поезда. <i>Ganzurino</i> : sale of tickets for all passenger trains
4	Ганзурино – Оронгой Ganzurino – Orongoi	93598–93602	12	<i>Оронгой</i> : посадка и высадка пассажиров на (из) поезда пригородного и местного сообщения. <i>Orongoi</i> : boarding and disembarking passengers to (from) commuter and local trains
5	Оронгой – Убукун Orongoi – Ubukun	93602–93606	14	<i>Убукун</i> : продажа билетов на все пассажирские поезда. <i>Ubukun</i> : sale of tickets for all passenger trains.
6	Убукун – Совхоз Тельман Ubukun – Sovkhoz Tel'man	93606–93608	12	<i>Совхоз Тельман</i> : продажа билетов на все пассажирские поезда. <i>Telman state farm</i> : sale of tickets for all passenger trains.
7	Совхоз Тельман – Сульфат Sovkhoz Tel'man – Sul'fat	93608–93610	13	<i>Сульфат</i> : продажа билетов на все пассажирские поезда; прием и выдача грузов повагонными отправлениями, загружаемых целыми вагонами, только на подъездных путях и местах необщего пользования. <i>Sulphate</i> : sale of tickets for all passenger trains; acceptance and release of goods by wagonloads, loaded with whole wagons, only on sidings and non-public areas.

Отсутствие на рассматриваемом участке электрификации тяговым током весьма благоприятно в свете внедрения автоматических систем, основанных на радиуправлении и радиосвязи, так как наведение индуктивных токов и сильных электромагнитных полей не будет создавать помех и искажений сигнала. Таким образом, перспектива автоматизации участка служит дополнительным доводом в вопросе отказа от его электрификации, что существенно сэкономит расходы ОАО «РЖД» [16, 17].

При более подробном планировании действий по оснащению железнодорожной сети АПК АУД, очевидна обоснованность модульного подхода: поэтапного внедрения относительно локальных подсистем. Так, первоочередным шагом усовершенствования на примере рассматриваемого участка представляется оснащение его системой «Автодиспетчер», отладка и освоение которой позволят уже к ней подключить подсистему «Автомашинист».

Весьма важным в процессе любой автоматизации, в том числе и внедрения АПК АУД, является так называемый «кадровый вопрос». С одной стороны, снижается востребованность локомотивных бригад: технология «Автомашинист» позволит перейти на управление сперва «в одно лицо», а затем и к полностью беспилотному. С другой стороны, в диспетчерские центры дорог потребуются операторы дистанционного управления движением поездов, а также обслуживающий новую систему технический персонал в составе дистанций СЦБ и эксплуатационных локомотивных депо. В этом случае представляется возможным переориентирование имеющихся работников, обученных

на новом уровне компетенций [18], что будет способствовать повышению как безопасности труда (в частности, дистанционирования работников от вредных воздействий локомотивов), так и его качества. Вместе с тем ожидаемое увеличение объемов перевозок на рассмотренном участке само по себе повысит потребность в персонале, специальности и требуемая квалификация которого будет зависеть от принятой доктрины развития обозначенного участка и всей сети российских железных дорог в целом.

Заключение

Опыт разработки и эксплуатации как отдельных компонентов, так и интегрированного АПК АУД на сети ОАО «РЖД» показал практическую применимость и востребованность интеллектуальных систем управления движением на железнодорожном транспорте. Рассмотренный действующий участок ВСЖД при оценке возможностей внедрения АПК АУД является перспективным для дальнейшей работы. Переход на автоматическое управление эксплуатационной работой реализуется множеством существенных изменений технического, технологического и организационного характера, что само по себе неизбежно в эволюционном прогрессе, однако требует внимательности и ответственности в ходе реализации многокритериальной и многофакторной задачи в условиях непрерывности выполнения перевозок, своевременной подготовки квалифицированных исполнителей самого перевооружения, а также пользователей новых технических средств и технологий.

Список литературы

1. Корольков Б.П., Комаров А.В. О системе кодирования подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2004. № 10. С. 46.
2. Якунин В.И. Инновационная деятельность в ОАО «РЖД» // Транспорт Российской Федерации. 2010. № 1 (26). С. 10–12.
3. Зелова М.И., Комаров А.В. Беспилотные технологии на транспорте. Перспективы развития // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12) : электрон. журн. URL: <https://mnv.irgups.ru/bespilotnye-tehnologii-na-transporte-perspektivy-razvitiya> (Дата обращения 08.10.2022).
4. Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., Ефремова А.П. Повышение качества входных данных для интеллектуального диспетчерского управления // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте : тр. восьмой науч.-практ. конф. М., 2019. С. 66–69.
5. Матюхин В.Г., Уманский В.И., Шабунин А.Б. О текущем состоянии проекта ИСУЖТ и реализации технологии интервального регулирования на его платформе // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте : тр. восьмой науч.-практ. конф. М., 2019. С. 3–7.
6. Goverde R. Trends and developments in the automation of heavy rail operations // Global Railway Review : site. URL: <https://www.globalrailwayreview.com/article/97734/trends-developments-automation-heavy-rail/> (access date: 15.10.2022).
7. ОАО «РЖД». Инновации // РЖД : сайт. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9381> (Дата обращения 08.10.2022).

8. Система управления перевозочным процессом и транспортная логистика // Инновационный дайджест : сайт. URL: www.rzd-expo.ru/innovation/the_system_of_transportation_process_and_transport_logistics (Дата обращения: 16.10.2022).
9. Москвичев О.В. Информационные технологии на транспорте и информационно-управляющие системы на магистральном транспорте. Самара : СамГУПС, 2015. 287 с.
10. Ефремов Г.А. Проблемы и особенности автоматического диспетчерского управления движением поездов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте : тр. восьмой науч.-практ. конф. М., 2019. С. 36–37.
11. Автоматизация диспетчерского управления в ИСУЖТ: опыт внедрения / В.Г. Матюхин, А.Б. Шабунин, Г.А. Ефремов и др. // Труды АО «НИИАС». 2021. Вып. 11. Т. 1. С. 204–214.
12. Осминин А.Т. О разработке интеллектуальной системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте // Наука 1520 ВНИИЖТ: загляни за горизонт : тр. первой междунар. науч.-практ. конф. Щербинка, 2021. С. 139–147.
13. Кокурин И.М. Интеллектуальная система управления движением поездов на основе автоматизации диспетчерского регулирования и центрального автоведения // Интеллектуальные системы управления. 2018. № 3. С. 305–312.
14. Паталахин С.В., Попов А.Э. Системы автономного управления подвижным составом на железной дороге // Цифровая наука. 2020. № 2-3. С. 31–36.
15. Украинский А.И. Автоматизированное управление поездной работой на железнодорожных перегонах // Труды 79-ой студ. науч.-практ. конф. РГУПС. Воронеж, 2020. Т. 1. С. 77–78.
16. Храмова Н.А., Храмов Р.И. Эффективность инновационных проектов в транспортных предприятиях // Стратегии бизнеса. 2019. № 9 (65). С. 16–19.
17. Ерофеев А.А. О состоянии и перспективах развития интеллектуальных систем управления перевозками на Белорусской железной дороге // Фёдор Петрович Кочнев – выдающийся организатор транспортного образования и науки в России : тр. междунар. науч.-практ. конф. М., 2021. С. 33–41.
18. Главные направления в транспортных инновациях // Инновации. Стартапы. Изобретения : сайт. URL: <https://viafuture.ru/katalog-idej/transportnye-innovatsii> (Дата обращения: 16.10.2022).

References

1. Korol'kov B.P., Komarov A.V. O sisteme kodirovaniya podvizhnogo sostava [About the rolling stock coding system]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2004, no. 10, pp. 46.
2. Yakunin V.I. Innovatsionnaya deyatel'nost' v OAO «RZHD» [Innovative activity in JSC «Russian Railways»]. *Transport Rossiiskoi Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2010, no. 1 (26), pp. 10–12.
3. Zelova M.I., Komarov A.V. Bepilotnye tekhnologii na transporte. Perspektivy razvitiya [Unmanned technologies in transport. Development prospects]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no. 2 (12), pp. 86–91.
4. Matyukhin V.G., Shabunin A.B., Efremova A.P. Povyshenie kachestva vkhodnykh dannykh dlya intellektual'nogo dispetcheskogo upravleniya [Improving the quality of input data for intelligent dispatch control]. *Trudy Vos'moi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte»* [Proceedings of the Eighth scientific-technical conference «Intelligent control systems for railway transport»]. Moscow, 2019, pp. 66–69.
5. Matyukhin V.G., Umanskiy V.I., Shabunin A.B. O tekushchem sostoyanii proekta ISUZHT i realizatsii tekhnologii interval'nogo regulirovaniya na ego platforme [About the current state of the project «Intelligent systems in railway transport» and the implementation of interval control technology on its platform]. *Trudy Vos'moi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte»* [Proceedings of the Eighth scientific-technical conference «Intelligent control systems for railway transport»]. Moscow, 2019, pp. 3–7.
6. Goverde R. Trends and developments in the automation of heavy rail operations. URL: <https://www.globalrailwayreview.com/article/97734/trends-developments-automation-heavy-rail/> (Accessed October 15, 2022).
7. OAO «RZHD»: Innovatsii (Elektronnyi resurs) [JSC «Russian Railways»: Innovations (Electronic resource)]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9381> (Accessed October 8, 2022).
8. Sistema upravleniya perevozochnym protsessom i transportnaya logistika (Elektronnyi resurs) [Transportation process management system and transport logistics (Electronic resource)] Available at: www.rzd-expo.ru/innovation/the_system_of_transportation_process_and_transport_logistics (Accessed October 16, 2022).
9. Moskvicev O.V. Informatsionnye tekhnologii na transporte i informatsionno-upravlyayushchie sistemy na magistral'nom transporte [Information technologies in transport and information management systems in mainline transport]. Samara: SamGUPS Publ., 2015. 287 p.
10. Efremov G.A. Problemy i osobennosti avtomaticheskogo dispetcherskogo upravleniya dvizheniem poezdov [Problems and features of automatic dispatching control of train traffic]. *Trudy Vos'moi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte»* [Proceedings of the Eighth scientific-technical conference «Intelligent control systems for railway transport»]. Moscow, 2019, pp. 36–37.
11. Matyuhin V.G., Shabunin A.B., Efremov G.A., Trepalin K.O., Efremova A.P. Avtomatizatsiya dispetcherskogo upravleniya v ISUZHT: opyt vnedreniya [Automation of dispatching control in intelligent railway transport management systems: implementation experience]. *Trudy AO «NIAS»* [Proceedings of the JSC «Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport»], 2021, vol. 1, pp. 204–214.
12. Os'minin A.T. O razrabotke intellektual'noi sistemy upravleniya perevozochnym protsessom na zheleznodorozhnom transporte [On the development of an intelligent control system for the transportation process in railway transport]. *Trudy Pervoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka 1520 VNIIZhT: zaglyani za gorizont»* [Proceedings of the First

International Scientific-Practical Conference «Science 1520 of the All-Russian Scientific-Research Institute of Railway transport: look beyond the horizon»]. Shcherbinka, 2021, pp. 139–147.

13. Kokurin I.M. Intellektual'naya sistema upravleniya dvizheniem poezdov na osnove avtomatizatsii dispetcherskogo regulirovaniya i tsentral'nogo avtovedeniya [Intelligent train traffic control system based on automation of dispatching control and central autodrivng]. *Intellektual'nye sistemy upravleniya* [Intelligent control systems], 2018, no. 3, pp. 305–312.

14. Patalakhin S.V., Popov A.E. Sistemy avtonomnogo upravleniya podvizhnym sostavom na zheleznoi doroge [Systems of autonomous control of rolling stock on the railway]. *Tsifrovaya nauka* [Digital Science], 2020, no. 2-3, pp. 31–36.

15. Ukrainskii A.I. Avtomatizirovannoe upravlenie poezdnoi rabotoi na zheleznodorozhnykh peregonakh [Automated control of train operation on railway stages]. *Trudy sem'desyat devyatoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of the Seventy Ninth student scientific-practical conference]. Voronezh, 2020, vol. 1, pp. 77–78.

16. Khramtsova N.A., Khramtsov R.I. Effektivnost' innovatsionnykh proektov v transportnykh predpriyatiyakh [Efficiency of innovative projects in transport enterprises]. *Strategii biznesa* [Business strategies], 2019, vol. 9 (65), pp. 16–19.

17. Erofeev A.A. O sostoyanii i perspektivakh razvitiya intellektual'nykh sistem upravleniya perevozkami na Belorusskoi zheleznoi doroge [On the state and prospects of development of intelligent transportation management systems on the Belarusian Railway]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Fedor Petrovich Kochnev – vydayushchiysya organizator transportnogo obrazovaniya i nauki v Rossii»* [Theodore Peter Kochnev is an outstanding organizer of transport education and science in Russia]. Moscow, 2021, pp. 33–41.

18. Glavnye napravleniya v transportnykh innovatsiyakh (Elektronnyi resurs) [The main directions in transport innovations (Electronic resource)]. Available at: <https://viafuture.ru/katalog-idej/transportnye-innovatsii> (Accessed October 16, 2022).

Информация об авторах

Зелова Мария Игоревна, кафедра управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: m.zelova@yandex.ru.

Комаров Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: ak38uer@gmail.com.

Information about the authors

Mariya I. Zelova, Department of Operational Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: m.zelova@yandex.ru.

Alexei V. Komarov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operational Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: ak38uer@gmail.com.

Результаты экспериментальных исследований электрогидроимпульсного дробления железобетонных отходов из демонтированных опор контактной сети

А.В. Юрьев¹, А.Е. Гаранин¹✉, Д.А. Юрьева², К.П. Ремянников³, Д.П. Миллер¹,
А.И. Малькова⁴, А.В. Сергиенко⁵

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

²ООО «РЦ «АСКОН-Енисей», г. Красноярск, Российская Федерация

³Красноярский региональный инновационно-технологический бизнес-инкубатор, г. Красноярск, Российская Федерация

⁴Кошурниковская дистанция сигнализации, централизации и блокировки – структурное подразделение Красноярской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», пос. Кошурниково, Российская Федерация

⁵Школа космонавтики, г. Железногорск, Российская Федерация

✉alexandergaranin@mail.ru

Резюме

Для вовлечения во вторичный оборот отходов V класса опасности, образуемых после демонтажа железобетонных конструкций инфраструктуры железнодорожного транспорта (опор контактной сети), распределенных географически на значительных расстояниях, предлагается выявить наилучшую доступную «зеленую технологию» утилизации, обладающую высокими технико-экономическими, эксплуатационными и санитарно-гигиеническими параметрами, позволяющую получать вторсырье непосредственно вблизи от мест образования и скопления отходов, что позволит исключить их дорогостоящие транспортирование, переработку и захоронение. Проведены экспериментальные исследования электрогидроимпульсного способа разрушения демонтированных опор контактной сети из центрифугированного железобетона класса прочности В40. Испытания проводились на разработанном экспериментальном образце комплекса дробления, основные конструктивные и технико-эксплуатационные параметры которого заключаются в высокой мобильности, компактности, малом весе, низком энергопотреблении, работе без образования пыли, высоком качестве получаемого вторсырья, простоте управления, обслуживания и транспортирования. Исследования электрогидроимпульсного способа разрушения показали высокие технико-эксплуатационные и экономические показатели, что в перспективе дает возможность реализовать технологию рециклинга железобетонных отходов во вторсырье, соответствующую критериям наилучшей доступной технологии в природоохранной деятельности. Развитие предложенной технологии до уровня опытно-промышленной эксплуатации в структурных подразделениях элетроэнергетического комплекса железнодорожного транспорта позволит достичь как целевого показателя Долгосрочной программы развития ОАО «РЖД» до 2025 г. по повышению уровня экологической безопасности в части увеличения доли обезвреживания и вовлечения отходов производства и потребления во вторичный оборот в общем количестве их образования, так и ускорит обеспечение технологического суверенитета России.

Ключевые слова

отходы железобетонного лома, зеленые технологии утилизации, электрогидроимпульсная технология дробления, ресурсосбережение, энергоэффективность

Для цитирования

Результаты экспериментальных исследований электрогидроимпульсного дробления отходов из демонтированных опор контактной сети / А.В. Юрьев, А.Е. Гаранин, Д.А. Юрьева, К.П. Ремянников, Д.П. Миллер, А.И. Малькова, А.В. Сергиенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 101–108. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).101-108.

Информация о статье

поступила в редакцию: 20.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 23.12.2022 г.; принята к публикации 26.12.2022 г.

Благодарность

Работа выполнена по гранту ОАО «РЖД» от 10 декабря 2019 г. № 3705143 для молодых ученых на проведение научных исследований, направленных на создание новой техники и технологий для применения на железнодорожном транспорте «Разработка технологии электрогидроимпульсной утилизации отходов железобетонного лома от демонтированных опор контактной сети и железнодорожных шпал для извлечения качественного вторсырья и производство экспериментально-го образца аппарата электрогидроимпульсного дробления отходов лома железобетона».

Results of experimental investigation of the electrohydroimpulse method for crushing reinforced concrete scrap waste from dismantled contact network supports of railway overhead line

A.V. Yur'ev¹, A.E. Garanin¹✉, D.A. Yur'eva², K.P. Remyannikov³, D.P. Miller¹,
A.I. Mal'kova⁴, A.V. Sergienko⁵

¹Krasnoyarsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

²«LCC «RC «ASCON-Enisey», Krasnoyarsk, the Russian Federation

³Krasnoyarsk Regional Innovation and Technology Business Incubator, Krasnoyarsk, the Russian Federation

⁴Koshurnikovskaya signaling, centralization and blocking distance – a structural subdivision of the Krasnoyarsk Directorate of Infrastructure – a structural subdivision of the Central Directorate of Infrastructure – a branch of JSC «Russian Railways», Koshurnikovo, the Russian Federation

⁵Cosmonautics School, Zheleznogorsk, the Russian Federation

✉alexandergaranin@mail.ru

Abstract

To involve the reinforced concrete V class hazard waste generated after dismantling reinforced concrete posts for railway infrastructure (overhead line posts) geographically distributed over considerable distances it is proposed to identify the best available «green technology» for recycling having high technical, economic, operational and sanitary parameters and allowing to obtain recyclable materials close to the places of waste generation and accumulation, which will eliminate costly transportation, processing and disposal of waste. Experimental investigation of the electrohydroimpulse method of crushing reinforced concrete railway overhead line posts made from heavy-weight class B40 concrete have been carried out. Design, technical and operational parameters of the experimental sample of the crushing complex are high mobility, compactness, light weight, low energy consumption, dust-free operation, high quality of the obtained recyclable materials, ease of management, maintenance and transportation. Experimental investigation of the electrohydroimpulse method of crushing has shown high technical, operational and economical parameters to ensure a promising opportunity of implementing the technology of recycling reinforced concrete waste into recyclable materials that meets the criteria of the best available technology in environmental protection. The development of technology to the level of pilot operation in the structural divisions of the electric power complex of railway transport will allow to achieve the target indicator of the Long-term Development Program of JSC «Russian Railways» until 2025 of raising the level of environmental safety in terms of increasing the share of neutralization and involvement of the waste production and consumption in secondary circulation in the total amount of its formation, as well as accelerate the provision of technological sovereignty of Russia.

Keywords

reinforced concrete scrap waste, green recycling technologies, electrohydroimpulse crushing technology, resource conservation, energy efficiency

For citation

Yur'ev A.V., Garanin A.E., Yur'eva D.A., Remyannikov K.P., Miller D.P., Mal'kova A.I., Sergienko A.V. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy elektrogidroimpul'snogo drobleniya zhelezobetonnykh otkhodov iz demontirovannykh opor kontaktnoi seti [Results of experimental investigation of the electrohydroimpulse method for crushing reinforced concrete scrap waste from dismantled contact network supports of railway overhead line]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 101–108. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).101-108.

Article Info

Received: October 20, 2022; Revised: December 23, 2022; Accepted: December 26, 2022.

Acknowledgement

The work was carried out under the grant of JSC «Russian Railways» No. 3705143, dated December 10, 2019, for young scientists to conduct scientific research aimed at creating new equipment and technologies for use in railway transport «Development of technology The development of technology to the level of pilot operation in the structural divisions of the electric power complex of railway transport will allow achieving. for electrohydroimpulse disposal of reinforced concrete scrap waste from dismantled contact network supports and railway sleepers for the extraction of high-quality recyclables and production of an experimental sample of the electrohydraulic apparatus-pulse crushing of scrap reinforced concrete waste».

Введение

Демонтированные железобетонные опоры контактной сети являются отходами V класса «Лом железобетонных изделий, отходы железобетона в кусковой форме» (код ФККО: 8 22 301 01 21 5) [1]. В соответствии с природо-

охранным законодательством эти отходы необходимо захоронить на специальном полигоне либо осуществить их утилизацию в срок до 11 мес. [2]. При этом приоритетным является уменьшение количества отходов и вовлечение их в хозяйственный оборот [3].

Сложность обслуживания и транспортирования традиционных комплексов дробления, основанных на механическом дроблении [4–8], а также высокая энергоемкость, большие занимаемые площади, значительная себестоимость утилизации требует поиска альтернативных ресурсо- и энергосберегающих «зеленых технологий» дробления, лишенных обозначенных недостатков. Известно о наличии более низких удельных затрат энергии и других достоинствах при динамических методах разрушения [9], основанных на электровзрывном действии, для которых характерно быстрое выделение электрической энергии с преобразованием в механическую при образовании ударных и взрывных волн. К электровзрывной технологии относится электрогидравлическая (электрогидроимпульсная) технология, основанная на «электрогидравлическом эффекте» Л.А. Юткина, при которой создаются сверх-

мощные давления от действия электрического разряда в жидкости [10–18].

В работе освещены результаты экспериментальных исследований дробления с помощью электрогидроимпульсной технологии, позволяющей получить до 100 % вторичных (рециклированных) сырьевых материалов в виде дробленого бетона и его составляющих (щебня, песка, песчано-щебеночной смеси), а также металла.

Целью испытаний являлось экспериментальная проверка применимости электрогидроимпульсной технологии разрушения демонтированных стоек опор контактной сети из центрифугированного железобетона, прочностные характеристики которого соответствуют нормативному классу прочности не ниже В40, посредством разработанного в соответствии с перспективными требованиями экспериментального комплекса.

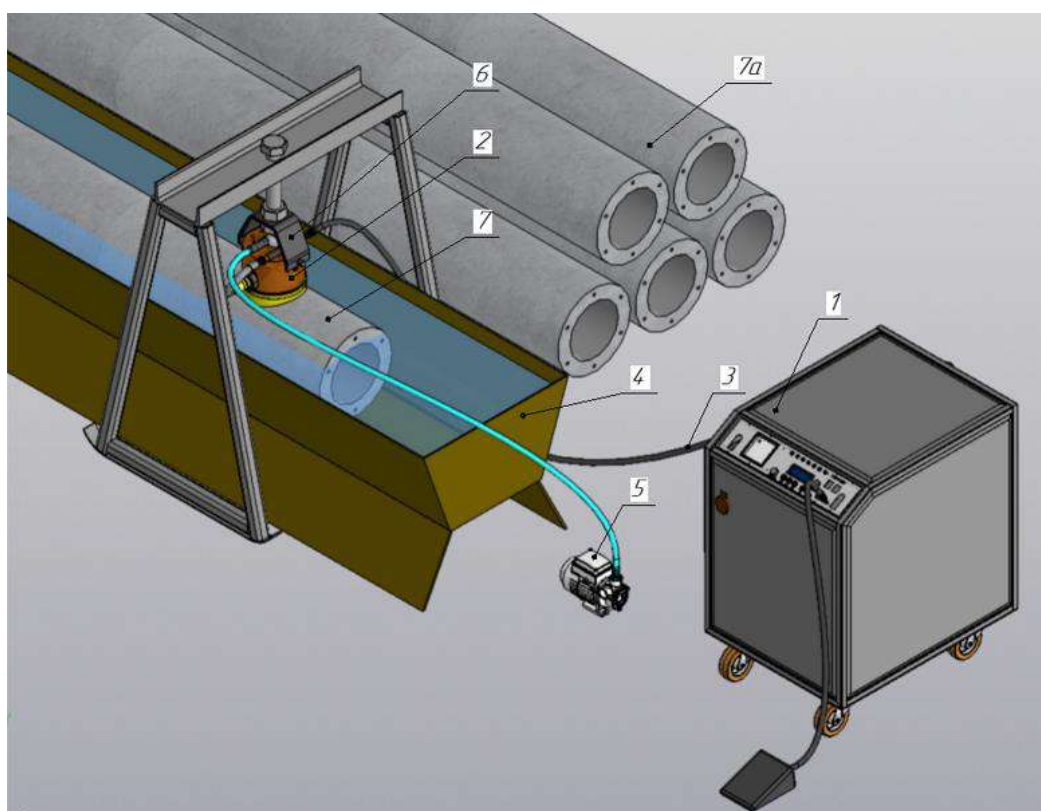


Рис. 1. Фрагмент трехмерной модели экспериментального комплекса:

- 1 – генератор импульсного тока; 2 – рабочий орган; 3 – высоковольтный кабель; 4 – технологическая емкость; 5 – система циркуляции рабочей жидкости (воды); 6 – передвижное устройство удержания рабочего органа; 7 – утилизируемая железобетонная опора контактной сети; 7а – железобетонные опоры для утилизации

Fig. 1. Fragment of a three-dimensional model of an experimental complex:

- 1 – pulse current generator; 2 – working body; 3 – high voltage cable; 4 – technological container; 5 – circulation system of the working fluid (water); 6 – mobile device for holding the working body; 7 – recyclable reinforced concrete support of the contact network; 7a – reinforced concrete supports to be disposed of

Перспективные требования к технологии электрогидроимпульсного дробления железобетонных опор контактной сети

Для соответствия признакам наилучшей доступной технологии в природоохранной деятельности, учитывающей существующие особенности образования железобетонных отходов на рассредоточенной территории железнодорожной инфраструктуры, сформулированы перспективные требования к комплексу электрогидроимпульсного дробления железобетонных отходов:

- оптимальные массогабаритные параметры «малый вес – малые размеры»;
- энергоэффективность (низкий расход электроэнергии и воды);
- мобильность и удобство транспортирования;
- экологичность – отсутствие вредного воздействия на окружающую среду и персонал (работа без пылеобразования);
- ресурсосбережение вторсырья (дробленый бетон без примесей металла, арматура без деформаций) (рис. 1).

На основе перспективных требований спроектирован и изготовлен экспериментальный образец аппарата электрогидроимпульсного разрушения железобетонных отходов из демонтированных опор контактной сети для их рециклинга во вторсырье.

Удалось реализовать перспективные требования и достичь соответствующие им технико-

эксплуатационные параметры, среди которых:

- высокие массогабаритные показатели генератора (размеры 0,62×0,8×0,81 м; масса 150 кг);
- использование «мягких режимов работы электрогидроимпульсной технологии» (разрядные напряжение до 20 кВ и энергия до 2,8 кДж);
- удобство транспортирования и обслуживания;
- увеличенный ресурс работы используемых компонентов и комплектующих;
- безотказность функционирования при приближенных к реальным эксплуатационным условиям в широком диапазоне влияющих факторов окружающей среды.

Методика и результаты испытаний

Перед началом испытаний образцы утилизируемых железобетонных опор подверглись визуальному контролю на предмет отсутствия внешних дефектов и трещин, а также ультразвуковой диагностике прибором УК1401М.

Испытания проводились в следующей последовательности. Фрагмент железобетонной опоры погружался в технологическую емкость, заполненную водой до минимального уровня 20 см, необходимого для работы системы циркуляции, использование которой позволило сократить примерно в 30 раз объем воды. Рабочий орган устанавливался полым основанием-вырезом на разрушаемый участок опоры и

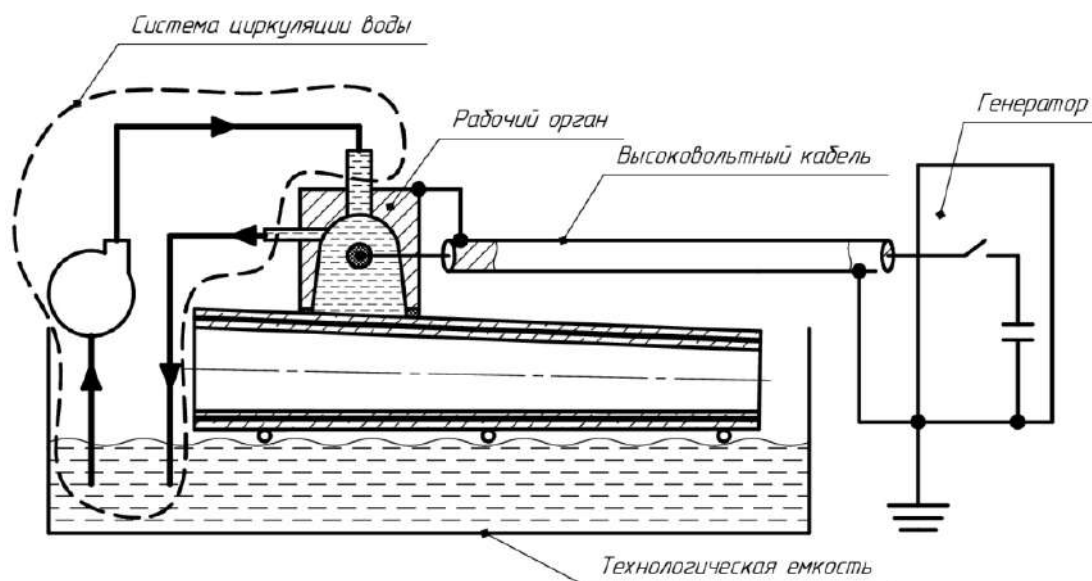


Рис. 2. Схематичный чертеж комплекса электрогидроимпульсного разрушения железобетонных конструкций
 Fig. 2. Schematic drawing of the complex of electrohydroimpulse destruction of reinforced concrete structures

удерживался посредством перемещающейся рамной конструкции.

В технологическую емкость помещали дренажный насос. После включения дренажного насоса обеспечивалась система замкнутой циркуляции воды из технологической емкости по отводящему шлангу в рабочую камеру рабочего органа, откуда избыток воды удалялся обратно в технологическую емкость через выходной трубопровод (штуцер) рабочего органа и частично через основание рабочего органа. Посредством коаксиального кабеля генератор соединялся с рабочим органом. Генератор подключался к внешней сети электропитания.

Генератор формировал в рабочем органе испытательные электрогидроимпульсные воздействия (разрядные напряжение и энергия варьировались в диапазоне 17–19 кВ и 2–2,5 кДж

соответственно), после чего осуществлялся визуальный контроль процесса разрушения железобетона – фоторегистрация и проверка качественных результатов приложения испытательных воздействий к испытуемому участку железобетонной конструкции на наличие образования и развития трещин, появления отколов и обрушений кусков бетона, состояния оголенной арматуры. После разрушения одного участка рабочий орган перемещается на следующий испытуемый участок железобетонной конструкции и действия повторялись. Схематический чертеж экспериментального комплекса показан на рис. 2.

Под действием ударных волн, образуемых серией электрических разрядов в заполненной водой рабочей камере рабочего органа, происходит последовательный процесс разрушения



Рис. 3. Процесс отслоения бетона от арматуры после приложения испытательных воздействий к железобетонной опоре типа:

a – ЖБК; *б* – СК 136.6-3

Fig. 3. Detachment of concrete from reinforcement after application of test actions to a reinforced concrete support of type:

a – «ZhBK»; *b* – «SK 136.6-3»

утилизируемой опоры, который заключается в образовании, накоплении и развитии трещин, приводящих к отслоению бетонных фрагментов от металлического арматурного каркаса. При этом физика процесса трещинообразования является приближенной к естественной, поскольку происходит в местах ослабленной прочности в структуре материала железобетона – на стыках разнородных компонентов.

Исследования проводились с железобетонными центрифугированными опорами различных типов: ненапряженный тип ЖБК и предварительно напряженный тип СК (рис. 3).

Благодаря реализованным техническим решениям в комплексе удалось добиться разрушения покрываемого рабочим органом участка железобетонной центрифугированной опоры в пределах пяти испытательных воздействий, соответствующих «мягким режимам» с разрядным напряжением в диапазоне 17–19 кВ и энергией 2–2,5 кДж. После приложения испытательных электрогидроимпульсных воздействий к образцам железобетонной опоры произошло отслоение бетона с его фрагментацией от арматурного каркаса, в результате получено вторичное сырье – щебень из дробленого бетона и металлическая арматура, внешний вид которых показан на рис. 4.

Лабораторные испытания при дроблении центрифугированных железобетонных опор контактной сети показали следующее:

- отделение дробленого бетона от арматуры составило 100 %;
- отсутствие разрушающих повреждений арматуры;
- низкий удельный расход электроэнергии и воды (3 кВт·ч и 1 м³) при перерасчете на разрушение 1 м³ центрифугированного железобетона.

Заключение

Экспериментальные исследования продемонстрировали применимость технологии электрогидроимпульсного разрушения для задач переработки и утилизации отходов после демонтажа железобетонной центрифугированной конструкции с высоким классом прочности В40 во вторичное сырье, а также соответствие экспериментального комплекса перспективным требованиям. В частности, достигнуты:

1. Высокие массогабаритные показатели комплекса (легкий вес и компактность у генератора: 0,8×0,62×0,9 м, 150 кг, у рабочего органа 0,4×0,2×0,15 м, 25 кг), что позволяет использовать его в качестве мобильного варианта.
2. Возможность работы в «мягких режи-



Рис. 4. Дробленный бетон и арматура

Fig. 4. Aggregates and steel armature made from recycled reinforced concrete

мах» при относительно низких рабочих напряжениях – 17–18 кВ, что значительно меньше используемых напряжений, известных из научно-инженерной литературы.

3. Реализованы усовершенствованные схемные и технические решения, позволившие снизить величины обратных напряжений при устранении колебательного режима разряда,

что повысило удельную мощность разряда на рабочем инструменте и увеличило ресурс работы емкостного накопителя примерно в 10 раз.

4. Стабильная работа при изменениях условий окружающей среды без сбоев зарядного устройства и подключенной к электросети аппаратуры.

Список литературы

1. Каталог отходов производства и потребления холдинга «РЖД» : утв. Департаментом охраны труда, промышленной безопасности и экологического контроля ОАО «РЖД» от 12.12.2018. М. : ОАО «РЖД», 2018. 156 с.
2. Об отходах производства и потребления : Федер. закон № 89-ФЗ от 24.06.1998 г. (в ред. 14.07.2022) // КонсультантПлюс : сайт. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локальной сети.
3. Стратегия экологической безопасности Российской Федерации до 2025 года : указ Президента № 176 от 19.04.2017 г. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41879> (Дата обращения: 13.10.2022).
4. Рекомендации по технологии разрушения некондиционных бетонных и железобетонных изделий механическим способом. М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1984. 9 с.
5. Рекомендации по применению продуктов переработки некондиционных бетонных и железобетонных изделий. М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1984. 10 с.
6. Рекомендации по переработке и использованию отходов предприятий сборного железобетона. М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1987. 18 с.
7. Трамбовецкий В.П. Повторное использование дробленого бетона // Бетон и железобетон. 2004. № 4. С. 24–26.
8. Кальгин А.А., Фахратов М.А., Сохряков В.И. Опыт использования отходов бетона в производстве бетонных и железобетонных изделий // Строительные материалы. 2010. № 6. С. 32–33.
9. Гусев Б.В., Загурский В.А. Вторичное использование бетонов. М. : Стройиздат, 1988. 96 с.
10. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л. : Машиностроение, 1986. 253 с.
11. Ким К.К., Костроминов А.А., Колосовская Н.А. Утилизация железобетонных опор контактной сети // Железнодорожный транспорт. 2006. № 10. С. 70–71.
12. Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling / H. Bluhm, W. Frey, H. Giese et al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2000. Vol. 7 (5). Pp. 625–636.
13. Controlled disintegration of rein-forced concrete blocks based on wave and fracture dynamics / Koji Uenishi, Naoyuki Shigeno, Shintaro Sakaguchi et al. // Procedia Structural Integrity. 2016. Vol. 2. Pp. 350–357.
14. Xiaodong Wang, Jiaxu Du, Ningjing Li. Research on Crushing Concrete Members by High-Voltage Pulse Discharge Technology // Advances in Civil Engineering. 2021. DOI 10.1155/2021/5511959 URL: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2021/5511959/> (Дата обращения: 17.11.2021).
15. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Г.А. Гулый, П.П. Малюшевский, Е.В. Кривицкий и др. М. : Машиностроение, 1977. 320 с.
16. Гулый Г.А., Малюшевский П.П. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах. Киев : Наук. думка, 1977. 208 с.
17. Малюшевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии. Киев : Наук. думка, 1983. 272 с.
18. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. Киев : Наук. думка, 1990. 208 с.

References

1. Katalog otkhodov proizvodstva i potrebleniya kholdinga «RZhD» : utverzhden Departamentom okhrany truda, promyshlennoi bezopasnosti i ekologicheskogo kontrolya ОАО «RZhD» 12.12.2018 g. [Catalog of production and consumption waste of the Joint Stock Company «Russian Railways»: approved by the Department of Labor Protection, Industrial Safety and Environmental Control of JSC «Russian Railways» on December 12, 2018]. Moscow: RZhD Publ., 2018. 156 p.
2. Federal'nyi zakon № 89-FZ ot 24 Iyunya 1998 goda «Ob otkhodakh proizvodstva i potrebleniya» (red. 14.07.2022) [Federal Law no 89-FL «On production and consumption waste» dated June 24, 1998 (edited by July 14, 2022)].
3. Ukaz Prezidenta №176 ot 19.04.2017 g. «Strategiya ekologicheskoi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii do 2025 goda» [Presidential Executive Order No 176 dated April 19, 2017 «Ecological Safety Strategy of the Russian Federation until 2025»]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41879> (Accessed October 13, 2022).
4. Rekomendatsii po tekhnologii razrusheniya nekonditsionnykh betonnykh i zhelezobetonnykh izdelii mekhanicheskim sposobom [Recommendations on the technology of destruction of substandard concrete and reinforced concrete products by mechanical means]. Moscow: NIIZhB Gosstroya SSSR Publ., 1984. 9 p.
5. Rekomendatsii po primeneniyu produktov pererabotki nekonditsionnykh betonnykh i zhelezobetonnykh izdelii [Recommendations for the use of processing products of substandard concrete and reinforced concrete products]. Moscow: NIIZhB Gosstroya SSSR Publ., 1984. 10 p.
6. Rekomendatsii po pererabotke i ispol'zovaniyu otkhodov predpriyatii sbornogo zhelezobetona [Recommendations for the processing and use of waste from prefabricated reinforced concrete enterprises]. Moscow: NIIZhB Gosstroya SSSR Publ., 1987. 18 p.

7. Trambovetskii V.P. Povtornoe ispol'zovanie drobленого бетона [Reuse of crushed concrete]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete], 2004, no. 4, pp. 24–26.
8. Kalgin A.A., Fakhratov M.A., Sokhryakov V.I. Opyt ispol'zovaniya otkhodov бетона v proizvodstve betonnykh i zhelezobetonnykh izdelii [Experience in the use of concrete waste in the production of concrete and reinforced concrete products]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials], 2010, no. 6, pp. 32–33.
9. Gusev B.V., Zagurskii V.A. Vtorichnoe ispol'zovanie betonov [Secondary use of concretes]. Moscow: Stroizdat Publ., 1988. 96 p.
10. Yutkin L.A. Elektrogidravlicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti [Electrohydraulic effect and its application in industry]. Leningrad: Mashinostroeniye Publ., 1986. 253 p.
11. Kim K.K., Kostrominov A.A., Kolosovskaya N.A. Utilizatsiya zhelezobetonnykh opor kontaktnoi seti [Utilization of reinforced concrete supports of the contact network]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport], 2006, no. 10, pp. 70–71.
12. Bluhm H., Frey W., Giese H., Hoppe P., Schultheiß C., Sträßner R. Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2000, vol. 7 (5), pp. 625–636.
13. Koji Uenishi, Naoyuki Shigeno, Shintaro Sakaguchi, Hiroshi Yamachi, Junichiro Nakamori. Controlled disintegration of reinforced concrete blocks based on wave and fracture dynamics. *Procedia Structural Integrity*, 2016, vol. 2, pp. 350–357.
14. Xiaodong Wang, Jiayu Du, Ningjing Li. Research on Crushing Concrete Members by High-Voltage Pulse Discharge Technology. *Advances in Civil Engineering*, 2021. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2021/5511959/9> (Accessed November 17, 2021).
15. Gulyi G.A., Malyushevskii P.P., Krivitskii E.V. et al. Oborudovaniye i tekhnologicheskie protsessy s ispol'zovaniem elektrogidravlicheskogo effekta [Equipment and technological processes using the electro-hydraulic effect]. Moscow: Mashinostroeniye Publ., 1977. 320 p.
16. Gulyi G.A., Malyushevskii P.P. Vysokovol'tnyi elektricheskii razryad v silovykh impul'snykh sistemakh [High-Voltage Electrical Discharge in Power Impulse Systems]. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 1977. 208 p.
17. Malyushevskii P.P. Osnovy razryadno-impul'snoi tekhnologii [Fundamentals of discharge-pulse technology]. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 1983. 272 p.
19. 18. Gulyi G.A. Nauchnye osnovy razryadno-impul'snykh tekhnologii [Scientific foundations of discharge-pulse technologies]. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 1990. 208 p.

Информация об авторах

Юрьев Анатолий Васильевич, инженер Регионального центра инновационного развития Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск; e-mail: magite@mail.ru.

Гаранин Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем обеспечения движения поездов Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск, e-mail: alexandergaranin@mail.ru.

Юрьева Дарья Анатольевна, ведущий менеджер PLM ООО «Региональный центр «АСКОН-Енисей», г. Красноярск; e-mail: yureva_da@ascon.ru.

Ремьянников Константин Петрович, начальник отдела инжиниринга и прототипирования Красноярского регионального инновационно-технологического бизнес-инкубатора, г. Красноярск; e-mail: somyzi@yandex.ru.

Миллер Данила Петрович, инженер Регионального центра инновационного развития Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск; e-mail: danil_m99@mail.ru.

Малькова Анастасия Игоревна, электромонтер Кошурниковской дистанции сигнализации, централизации и блокировки – структурного подразделения Красноярской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», пос. Кошурниково; e-mail: nastyusha.malkova.00@mail.ru.

Сергиенко Александр Владимирович, Школа космонавтики, г. Железногорск; e-mail: alexandergaranin@mail.ru.

Information about the authors

Anatolii V. Yur'ev, Engineer of the Regional Center for Innovative Development, Krasnoyarsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk; e-mail: magite@mail.ru.

Alexander E. Garanin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Train Traffic Support Systems, Krasnoyarsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk; e-mail: alexandergaranin@mail.ru.

Dar'ya A. Yur'eva, Lead Manager PLM «LCC «RC «ASCON-Eнисей», Krasnoyarsk; e-mail: yureva_da@ascon.ru.

Konstantin P. Remyannikov, Head of the Department of Engineering and Prototyping, Krasnoyarsk Regional Innovation and Technology Business Incubator, Krasnoyarsk; e-mail: somyzi@yandex.ru.

Danila P. Miller, Engineer of the Regional Center for Innovative Development, Krasnoyarsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk; e-mail: danil_m99@mail.ru.

Anastasiya I. Mal'kova, electrical Engineer of Koshurnikovskaya signaling, centralization and blocking distance – a structural subdivision of the Krasnoyarsk Directorate of Infrastructure – a structural subdivision of the Central Directorate of Infrastructure – a branch of JSC «Russian Railways», Koshurnikovo; e-mail: nastyusha.malkova.00@mail.ru.

Alexander V. Sergienko, Cosmonautics School, Zheleznogorsk; e-mail: alexandergaranin@mail.ru.

Применение солнцезащитного навеса для стабилизации оползневых процессов на 1686–1688 км ПЧ-27 Восточно-Сибирской железной дороги

Д.А. Ковенькин¹✉, Н.А. Валиев²

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

²Новочарская дистанция пути Восточно-Сибирской железной дороги, пос. Новая Чара, Российская Федерация

✉kovenkin_da@irgups.ru

Резюме

В ходе исследования были проанализированы основные дефекты и деформации земляного полотна в границах Новочарской дистанции пути. Отмечена высокая динамика роста деформаций. За 27 лет количество «больных» мест земляного полотна увеличилось в 8,87 раз, а их длина в 14,78 раз. Проведен расчет оползневой опасности на участке. Результаты расчетов численных показателей надежности характеризуют данные оползневые объекты как опасные с активным протеканием оползневых процессов. Учитывая, что величины значений всех показателей надежности ниже допустимых, на данных объектах необходимо проведение противодеформационных мероприятий. Выявлены причины деформаций. Из-за нарушения почвенно-растительного слоя и мохового покрытия при уширении земляного полотна в 2014 г. под второй путь увеличился поглощающий утепляющий эффект, а также выросла инфильтрация летних осадков. Все это привело к опусканию кровли мерзлоты под низовыми откосами насыпей и снизило устойчивость земляного полотна до критического уровня. В статье дана оценка эффективности применения проектных решений, предложенных проектным институтом. Основными причинами низкой эффективности этих решений является недостоверность инженерно-геологических и геодезических изысканий, а также нарушение технологии строительства. Разработаны и реализованы мероприятия для стабилизации оползневых процессов на участках Новочарской дистанции пути. Применение солнцезащитных сооружений для предотвращения деградации многолетнемерзлых грунтов основания земляного полотна железных дорог доказало свою высокую эффективность. Кроме того, вынесено решение о запрете применения и устройства скальной наброски из глыбовых грунтов на оползневых косогорах.

Ключевые слова

деформации земляного полотна, оползневые процессы, показатели надежности, противодеформационные мероприятия, Новочарская дистанция пути, солнцезащитные сооружения, многолетнемерзлые грунты

Для цитирования

Ковенькин Д.А. Применение солнцезащитного навеса для стабилизации оползневых процессов на 1686 – 1688 км ПЧ-27 ВСЖД / Д.А. Ковенькин, Н.А. Валиев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 109–122. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).109-122.

Информация о статье

поступила в редакцию: 16.12.2022 г.; поступила после рецензирования: 26.12.2022 г.; принята к публикации: 27.12.2022 г.

Application of a sun- and precipitation protective shed to stabilize landslide processes on 1686–1688 km WP-27 of the East Siberian Railway

D.A. Koven'kin¹✉, N.A. Valiev²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Novocharskaya distance of the East Siberian Railway, Novaya Chara, the Russian Federation

✉kovenkin_da@irgups.ru

Abstract

In the course of this work, the analysis of the main defects and deformations of the roadbed within the boundaries of the Novocharskaya distance of the track was carried out. The high dynamics of deformation growth is noted. For 27 years, the number of “sick” places of the roadbed has increased by 8,87 times, by 14,78 times. The calculation of the landslide hazard on the site was carried out. The results of calculations of numerical reliability indicators characterize these landslide objects as dangerous with the active flow of the landslide process. Considering that the values of all reliability indicators are below the acceptable, it is necessary to carry out anti-deformation measures at these facilities. The causes of deformations are revealed. Due to the violation of the soil-vegetation layer and moss cover, with the widening of the roadbed in 2014 for the second track, there was an increase in the absorbing warming effect, as well as in the infiltration of summer precipitation. All this led to the lowering of the permafrost roof under the lower slopes of the embankments and reduced the stability of the roadbed to a critical level. An efficiency

assessment of the application of design solutions proposed by the design institute is given. The main reasons for the low efficiency of these solutions are the unreliability of geo-engineering and geodetic surveys, as well as the violation of construction technology. Measures have been developed and implemented to stabilize landslide processes in the sections of the Novo-Charskaya distance of the track. The use of sun-planting protection structures to prevent the degradation of permafrost soils of the base of the railway roadbed has proven to be highly efficient. In addition, a decision was made to ban the use and installation of rock sketches from blocky soils on landslide slopes.

Keywords

deformations of the roadbed, landslide processes, reliability indicators, anti-deformation measures, Novocharskaya distance of the track, sun protection structures, permafrost soils

For citation

Kovenkin D.A., Valiev N.A. Primenenie solntseosadkozashchitnogo navesa dlya stabilizatsii opolznevnykh protsessov na 1686–1688 km PCh-27 Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi [Application of a sun- and precipitation protective shed to stabilize landslide processes on 1686 – 1688 km WP-27 of the East-Siberian Railway]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 109–122. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).109-122.

Article info

Received: December 16, 2022; Revised: December 26, 2022; Accepted: December 27, 2022.

Введение

Центральный участок Байкало-Амурской магистрали (БАМ) с 1645 по 1862 км обслуживается Новочарской дистанцией пути. Железнодорожная линия с запада на восток пересекает Чарскую котловину, хребты Кодар (с тоннелем длиной 1,98 км) и Удокан. Эксплуатационная длина участка пути составляет около 218 км, в том числе протяженность земляного полотна чуть более 210 км. На всем протяжении данного участка развиты многолетнемерзлые грунты (ММГ) [1–7].

Еще во время строительства БАМа начались процессы деградации сильнольдистых

многолетнемерзлых грунтов в основании земляного полотна. После сдачи участка в постоянную эксплуатацию в 1988–1989 гг. в дистанции возникла необходимость ведения журналов формы ПУ-9 (Паспорт неустойчивого или деформирующегося земляного полотна). В начале 1996 г. количество мест с деформациями земляного полотна (ДЗП) составило 21 место, протяженностью более 5 км, в том числе мест с осадкой 15 шт., общей длиной 3,5 км. По осеннему осмотру 2022 г. количество мест с деформациями достигло 154, их суммарная протяженность приблизительно равна 66 км (31,49 % от эксплуатационной длины участка). Из них с

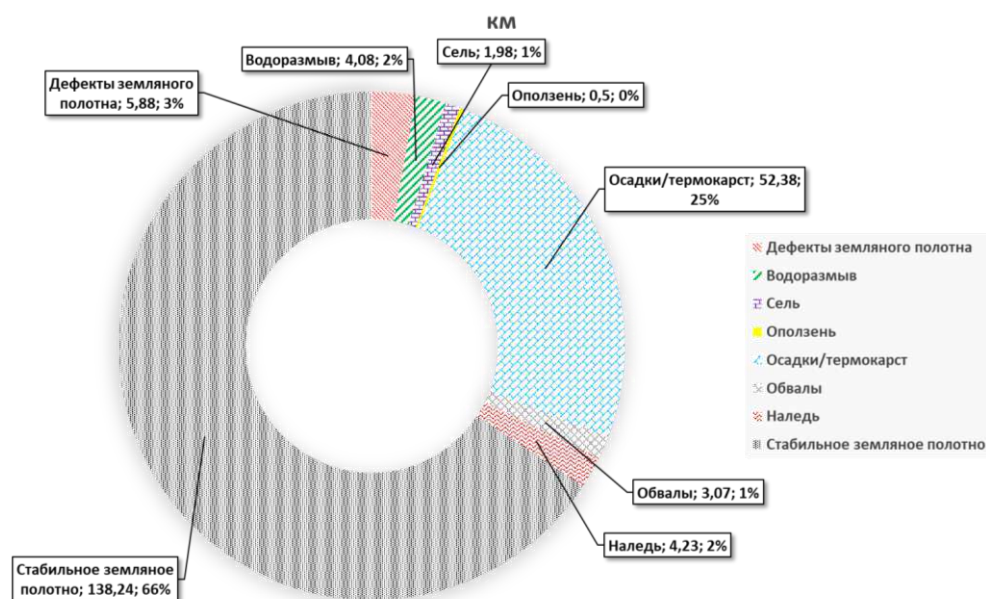


Рис. 1. Дефекты и деформации земляного полотна ПЧ-27 по состоянию на 14 октября 2022 г

Fig. 1. Defects and deformations of the roadbed of the WP-27 on October 14, 2022

осадками и термокарстовыми явлениями 133 места, протяженностью более 52 км (79,08 % от длины ДЗП). Таким образом, за 27 лет количество «больных» мест земляного полотна увеличилось в 8,87 раз, а их длина в 14,78 раз. Повсеместно на местах ДЗП развиты дефекты в виде зауженной ширины обочины и завышенной крутизны откосов (153 места суммарной длиной 5,9 км или 2,79 % от эксплуатационной длины участка). Классификация деформаций и дефектов приведена на рис. 1.

Виды деформаций земляного полотна и причины их появления в Новочарской дистанции пути

Земляное полотно и искусственные сооружения на перегоне Сакукан – Салликит 1699–1679 км с востока на запад построены под два пути. Строительство велось с сентября 1983 г. по март 1984 г. Укладка первого пути выполнена в апреле 1984 г.

В марте 2014 г. началось строительство второго пути на этом перегоне. Эксплуатационная длина участка 17,98 км. Можно сказать, что в результате этого строительства начали активно

развиваться деградации ММГ в основании высоких насыпей на оползневых косогорах. В дальнейшем эти деформации способствовали интенсивному росту осадок как строящегося второго пути, так и действующего первого пути. До начала строительства второго пути в январе 2014 г. на перегоне Салликит – Сакукан имелись 18 мест ДЗП, протяженностью 6 км. В октябре 2022 г. количество таких мест увеличилось до 20, а их протяженность составила 7,3 км. Основными видами деформаций, развивающихся на этом участке, стали осадки – 14 мест суммарной длиной 5,4 км, термокарст – 5 мест протяженностью 1,4 км и наледь – 1 место длиной 0,5 км. Во время строительства были сняты с учета 3 места ДЗП (0,57 км), в то же время заведены ПУ-9 на 5 местах длиной 1,18 км. В 9 местах протяженность ДЗП продлена на 0,6 км. Также на данном участке заужена ширина обочины справа по ходу километров. Для устранения этого дефекта проектом выполнено уширение основной площадки земляного полотна на 3,0 м общей длиной 9 км, в том числе на участках ДЗП длиной 2,6 км. Проектные работы по вырезке-досыпке, уширению основной площадки



а



б

Рис. 2. Водоотвод на 1686 км ПК3-4 слева по ходу километров:

а – деревянный лоток с камнем (23 мая 2014 г.); б – канава-траншея (4 ноября 2014 г.)

Fig. 2 Drainage at the 1686-th km Picket 3-4 on the left along the course of kilometers:

а – drainage structure wooden tray with stone (May 23, 2014); б – ditch-trench (November 4, 2014)



а



б

Рис. 3. Водоотвод на 1686 км ПК4-5 слева (а), вид против хода километров (грунт вырезки на рельефе от 7 октября 2022 г.; берма справа (б), вид сверху (трещины отрыва на берме от 11 октября 2022 г.)

Fig. 3. Drainage at the 1686-th km PK4-5 on the left (а), a view against the course of kilometers (ground cut on the relief dated October 7, 2022; berm on the right (б), top view (separation cracks on the berm dated October 11, 2022)

земляного полотна под второй путь и сооружению бERM на 1685–1688 км выполнены за июнь – август 2014 г. На оползневом косогоре на 1685 км ПК10 – 1686 км ПК5 в стесненных условиях, с льдистыми ММГ, после вырезки в октябре – ноябре 2014 г. слева от водоотводных сооружений (рис. 2, *а*) устроена канава-траншея (автопроезд) шириной до 4,0 м (рис. 2, *б*). После появления трещин отрыва слева в канаве-траншее на 1686 км ПК1 с термокарстовыми провалами и справа на берме 1686 км ПК4-5, водоотводы не ремонтировались.

В октябре 2022 г. силами подрядной организации выполнена нарезка в траншее-автопроезде под водоотводную канаву на 1686 км ПК1-5 со складированием грунта вырезки на откос рельефа (рис. 3, *а*) слева. Этого ни в коем случае нельзя было делать. Дело в том, что при строительстве насыпи высотой 11,08 м в 1983 г. на этом месте лог пересечен без искусственных сооружений (ИССО). Из-за складирования грунта на откос рельефа в том месте, где отсутствует ИССО, произошло переувлажнение грунта, что привело к образованию трещин отрыва бермы справа (рис. 3, *б*).

На участке 1685 ПК10 – 1688 км ПК4 зем-

ляное полотно с высокими насыпями расположено на следующих отметках:

- 1686 км ПК1 высотой до 16,44 м, на косогоре 1:3,99;
- 1686 км ПК5 высотой до 11,08 м, на косогоре 1:2,23;
- 1686 км ПК8 высотой до 18,36 м, на косогоре 1:8;
- 1687 км ПК5 высотой до 19,41 м, на косогоре 1:5;
- 1688 км ПК1 высотой до 8,74 м, на косогоре 1:3,6.

Из-за нарушения почвенно-растительного слоя (ПРС) и мохового покрытия с низовой (правой) стороны при уширении земляного полотна в 2014 г. под второй путь увеличился поглощающий утепляющий эффект, а также выросла инфильтрация летних осадков. Все это привело к опусканию кровли мерзлоты под низовыми откосами насыпей и снизило устойчивость земляного полотна до критического уровня, что повлекло оползание всей насыпи на 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1 (рис. 4, 5), 1686 км ПК9-10 (рис. 6), 1687 км ПК4-5 и отрыв с оползанием бERM на 1686 км ПК4-5 (рис. 7), 1688 км ПК2-3 (рис. 8).



Рис. 4. Трещины отрыва оползня 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1:

а – 1687 км ПК9 справа (сентябрь 2019 г.); *б* – 1688 км ПК1 слева (май 2019 г.);

в – 1688 км ПК1 справа (май 2016 г.)

Fig. 4. Landslide separation cracks 1687 km PK10 – 1688 km PK1:

a – 1687 km PK9 on the right (September, 2019); *b* – 1688 km PK1 on the left (May, 2019);

c – 1688 km PK1 on the right (May, 2016)



Рис. 5. Оползание первого и второго пути 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1, июль 2020 г

Fig. 5. Landslide first and second tracks 1687 km PK10 – 1688 km PK1, July 2020

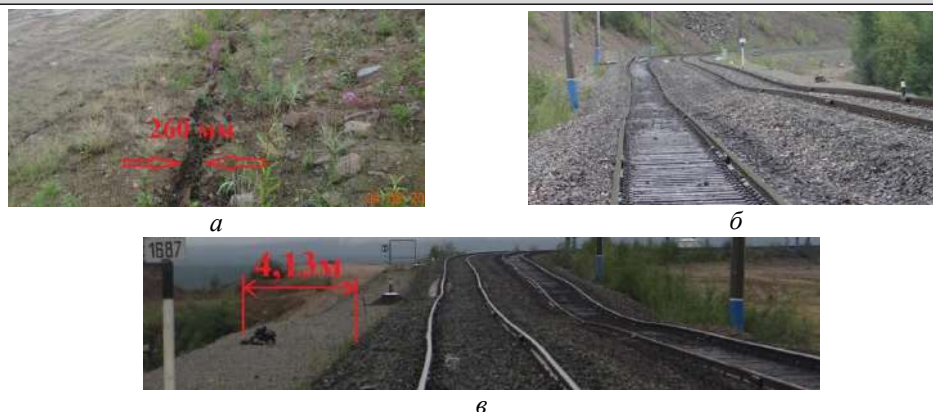


Рис. 6. Оползание первого и второго пути, 1686 км ПК9-10:

a – трещины отрыва оползня (август 2020 г.); *б* – оползание первого и второго пути (август 2020 г.);
в – 1686 км ПК9-10, обочина шириной 4,13 м, вид против хода километров

Fig. 6. Landslide of the first and second tracks, 1686 km PK9-10:

a – cracks of landslide separation (August, 2020); *b* – landslide of the first and second tracks (August, 2020);
c – 1686 km PK9-10, shoulder width of 4,13 m, view back km



Рис. 7. Берма, 1686 км ПК4 (август, 2020 г.)

Fig. 7. Berm, 1686 km PK4 (August, 2020)



Рис. 8. Берма, 1688 км ПК2 (май, 2022 г.)

Fig. 8. Berm, 1688 km PK2 (May, 2022)

С момента появления трещин справа на обочине с июня 2016 г. на участке ДЗП 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1 скорость движения поездов ограничивалась по первому пути 37 раз, в том числе 19 раз до 60 км/ч, 17 раз до 40 км/ч и 1 раз до 25 км/ч. С 2017 г. на 1686 км ПК9-10 по первому пути скорость ограничивалась 20 раз, в том числе 7 раз до 60 км/ч и 13 раз до 40 км/ч.

В настоящее время на участке 1686 км ПК9 – 1688 км ПК3 длиной 1,50 км, согласно распоряжению ОАО «РЖД» № 1154/р от 27 апреля 2022 г., действует постоянное ограничение скорости до 40 км/ч.

Анализ оползневой опасности на участке Салликит – Сакукан

Участки пути, расположенные на оползневых склонах, относятся к наиболее сложным по инженерно-геологическим условиям участкам, на которых существует опасность возникновения внезапных деформаций, напрямую

угрожающих безопасности движения поездов. Последствиями таких деформаций являются значительные затраты на восстановление и ремонт железнодорожного пути [8].

Для оценки оползневой опасности на участке Салликит – Сакукан с 1687 км ПК10 по 1688 км ПК1 и 1686 км ПК9-10 были определены численные критерии его надежности [9–11].

Исходные данные к расчету показателей надежности: суммарная протяженность участка равна 0,3 км; на данном участке два места деформаций; за период времени наблюдений принят временной интервал $\Delta T = 27$ лет; число отказов за этот период принято $n = 57$.

Определены критерии надежности:

1. Интенсивность потока существенных отказов, один / год:

$$\lambda = n / (N \cdot \Delta T),$$

где n – число отказов (шт.), зафиксированных в однородной группе объектов за интервал времени ΔT (годы); N – число объектов в однородной

группе участков железнодорожного пути (шт.).

2. Вероятность безотказной работы при возникновении существенного (частичного) отказа в следующем году эксплуатации, %:

$$P(\Delta t) = \exp(-\lambda \Delta t).$$

При этом вероятность возникновения отказа вычисляется по формуле:

$$Q(\Delta t) = 1 - P(\Delta t),$$

тогда

$$\lambda = 57 / (2 \cdot 27) = 1,06 \text{ отказа в год};$$

$$P(\Delta t) = \exp(-1,06 \cdot 1) \cdot 100 \% = 34,65 \%;$$

$$Q(\Delta t) = 65,35 \%.$$

Для оценки надежности объекта необходимо установление допустимой величины вероятности безотказной работы [P]. Для объектов земляного полотна в сложных инженерно-геологических условиях, на которых возможно возникновение деформаций основания земляного полотна, значение величины [P] может быть задано исходя из условия возникновения не более одного отказа за временной интервал $t_{\text{экс}}$, тогда при $t_{\text{экс}} = 100$ лет [P] = 0,99.

Результаты расчетов численных показателей надежности характеризуют данные оползневые объекты как опасные с активным протеканием оползневых процессов. Учитывая, что величины значений всех показателей надежности ниже допустимых, на данных объектах необходимо проведение противодеформационных мероприятий.

Разработка мероприятий для стабилизации оползневых процессов на участках Новочарской дистанции пути

Из-за отсутствия в проекте противодеформационных мероприятий для стабилизации ДЗП на 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1 слева и справа, в марте 2020 г. силами ПЧ-27 приступили к устройству солнцесадкозащитного комплекса (ИССО «СозН») площадью 1 882,0 м², в том числе строительству «Термокомплекса» (ИССО «ТМК») [1–7] площадью 300,0 м². На рис. 9 представлен проект солнцесадкозащитного комплекса.

Для устранения зауженной обочины слева (до 40 см) от первого пути на 1688 км ПК1 устроили навес в виде «Охлаждающая обочина-откос-берма» (ИССО «О О-О-Б»). На 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1 восстановили обочину до ширины 0,75 м, в том числе на участке 1688 км ПК1 до 1,0 м, (рис. 10, а). В качестве материала для восстановления использовали старогородные шпалы лиственных пород. С апреля по октябрь 2020 г. устроена обочина площадью 40,90 м², навес над пазухой шириной 2,75 м площадью 132,0 м² (рис. 10, б). Общая площадь сооружения составила 172,9 м² (14,14 % от ИССО «СозН»).

Наиболее интенсивные раскрытия трещин произошли с 13 по 20 июля 2020 г. на 1688 км ПК1 справа на обочине, на берме и у подошвы бермы. Скорость раскрытия трещин составляла до 10 мм в неделю. В результате ско-

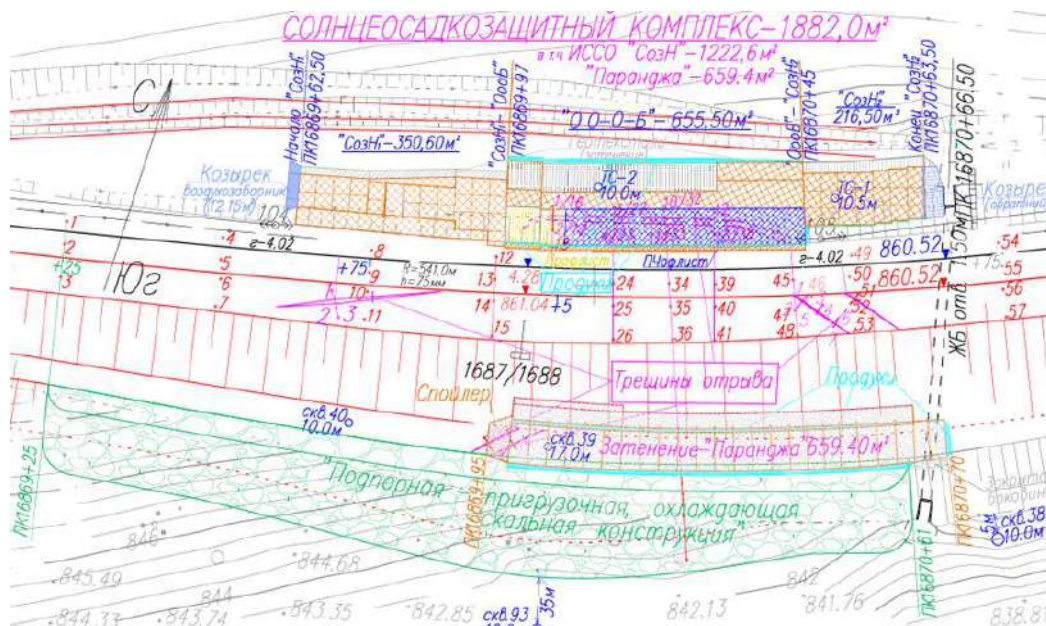


Рис. 9. План солнцесадкозащитного комплекса на 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1

Fig. 9. The plan of the sun protection complex for 1687 km PK10 – 1688 km PK1

*a**b***Рис. 10.** 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1:

a – обочина (апрель, 2020 г.); *b* – навес над пазухой и обочина (октябрь, 2020 г.)

Fig. 10. 1687 km PK10 – 1688 km PK1:

a – curb (April, 2020); *b* – canopy over the bosom and curb (October, 2020)

рость движения ограничена до 25 км/ч, выставлен пост наблюдения.

Для исправления ситуации по проекту института «Иркутскжелездорпроект» (ИЖДП) от 30 апреля 2020 г. после ограничения скорости движения поездов выполнены:

1. С 21 июля по 5 августа 2020 г. подпорная-пригрузочная охлаждающая скальная конструкция на 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1 справа в объеме 4 042,60 м³.

2. В сентябре 2020 г. водоотводная канава на участке 1687 км ПК7 – 1688 км ПК1.

К сожалению, данные решения были запоздалыми и не оказали должного эффекта.

На самом активно развивающемся участке ДЗП с трещинами отрыва 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1 для ускорения процесса замораживания массива скальной конструкции и использования охлаждающей способности прямоугольной железобетонной трубы отверстием 1,50 м в теле насыпи с марта по октябрь 2021 г. устроено сооружение ИССО «СозН» – «Паранджа» (рис. 11).

*a**b***Рис. 11.** «Паранджа» 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1, октябрь, 2021 г.:

a – вид сверху с востока; *b* – со спойлером, вид с запада

Fig. 11. «Burqa» 1687 km PK10 – 1688 km PK1, October, 2021:

a – top view from the east; *b* – with spoiler, view from the west

Ширина сооружения справа над скальной наброской составила до 1,5–2,0 м, над бермой – 4,5 м и над откосом насыпи – 2,5 м. В качестве строительного материала использовались бревна, проволока, геотекстиль для термоизоляции и геомембрана для гидроизоляции. Для защиты кровли от парусности и ветровой нагрузки применен спойлер. Общая площадь сооружения составила 659,40 м².

В табл. 1 приведены данные нивелирования по маркам на самом интенсивно развивающемся участке ДЗП. Данные представлены за период с июня 2019 г. по апрель 2022 г.

До устройства навеса максимальные осадки на область земляного полотна составляли 144–53 мм/год. Уже во время устройства навеса их количество уменьшилось до 62–15 мм за период с августа 2021 г. по апрель 2022 г., т. е. в 2,32–3,53 раза.

По замерам раскрываемости трещин по маркам на 1688 км ПК0+22,3 слева в пазухе и справа на обочине максимальный рост раскрываемости трещин отрыва до устройства ИССО

«СозН» составлял 39 мм (с июня по сентябрь 2020 г.), а за время устройства навеса рост снизился до 5 мм (с июня по сентябрь 2022 г.), т. е. в 7,8 раза.

Распределение температуры грунтов по глубине под ИССО «СозН», под «Паранджа» и вне навеса на 5.10.2021 г. и на 26.09.2022 г. по замерам температур в термоскважинах приведено в табл. 2.

Данные табл. 2 показывают, что охлаждающий эффект ИССО «СозН» с каждым годом возрастает, это отмечается в пределах всего слоя годовых колебаний температур грунтов. Под ИССО «СозН» наблюдается постепенное проникновение холода в глубину массива по сравнению с массивом грунта вне навеса в течение одного года:

1. Под ИССО «СозН» по ТС-2 создали мерзлый пласт на глубине 3,60–4,95 м, толщиной 1,35 м, кровлю ММГ подняли с 9,57 м до 8,05 м (на 1,52 м).

2. На берме со скальной наброской под «Паранджа» по ТС-39 на 1688 км ПК0+10 кровлю ММГ подняли с 5,46 м до 4,55 м (на 0,91 м), тогда как по ТС-40 вне его на 1687 км ПК9+75 на той же берме со скальной наброской кровля ММГ опустилась с 4,80 м до 6,05 м.

3. В лесу, вне техногенной зоны, где почвенно-растительный слой и моховое покрытие не тронуты, за этот же период произошло опускание кровли мерзлоты с 0,85 м до 0,92 м (на 0,07 м).

Таблица 1. Результаты нивелирования по маркам на 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1

Table 1. The results of leveling by tags at the 1687-th km PK10–1688 km PK1

км ПК +	Марка № Tag	Местоположение марок Tag location	Дата нивелирования, отметки марок Leveling date, stamp marks				Величина осадки, за год и за 8 мес. (мм) Precipitation value, for a year and for 8 months (mm)	
			10.06. 2019 June 10, 2019	2.06. 2020 г June 2, 2020	Данные инженерно- геологической базы г. Северобайкальск Engineering data by the geological base Severo- baikalsk		10.06.2019 – 2.06.2020 June 10, 2019 – June 2, 2020	12.08.2021 – 21.04.2022 г. August 12, 2021 – April 21, 2022
					12.08.2021 г	21.04.2022 г		
1687 км ПК9+95	13	м/п	860,843	860,741	860,571	860,509	102	62
	14	Право Right	860,007	859,885	859,721	859,665	122	56
	15	Право Right	859,980	859,867	859,724	859,679	113	45
1688 км ПК0+03,9	18	Лево Left	860,093	860,040	859,976	859,961	53	15
	19	м/п	860,761	860,673	860,548	860,514	88	34
	20	Право Right	859,811	859,678	859,501	859,449	133	52
	21	Право Right	859,854	859,735	859,598	859,554	119	44
1688 км ПК0+13,7	24	м/п	860,694	860,614	860,533	860,489	80	44
	25	Право Right	859,673	859,533	859,358	859,315	140	43
	26	Право Right	859,625	859,505	859,379	859,324	120	55
1688 км ПК0+22,3	34	м/п	860,727	860,650	860,577	860,538	77	39
	35	Право Right	859,585	859,441	859,250	859,188	144	62
	36	Право Right	859,625	859,510	859,378	859,329	115	49
1688 км ПК0+29,7	39	м/п	860,644	860,572	860,508	860,466	72	42
	40	Право Right	859,655	859,517	859,320	859,259	138	61
	41	Право Right	859,569	859,454	859,318	859,269	115	49

Эффективность мероприятий для стабилизации оползневых участков, разработанных проектными институтами

Сравним достигнутые результаты на участке ДЗП 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1 с применением ИССО «СозН» и «Паранджа» с аналогичным ДЗП на участке 1686 км ПК8 – 1687 км ПК1 с проектными противодеформационными мероприятиями, широко применяемой скальной наброской.

За октябрь – декабрь 2020 г. справа по проекту ИЖДП выполнено устройство бермы из глыбовых скальных грунтов фракции 0,2–0,5 м (рис. 12, а) в объеме 8,0 тыс. м³ (29,85 % от ск./набр.). С июня по октябрь 2021 г. справа выполнено устройство «Контрбанкет и берма из глыбовых скальных грунтов фракции 0,2–0,5 м» в полном объеме 26,8 тыс. м³ (рис. 12, б).

Таблица 2. Данные замеров температуры грунтов в термоскважинах под искусственным сооружением «СозН», «Паранджа» и вне навеса

Table 2. Measurements data of soil temperature in thermal wells under the artificial structure «SosN», «Burqa» and outside the canopy

Места, время замеров T(°C) и месторасположение термоскважин (ТС) Places, time of measurements T (°C) and location of thermal wells (TW)		Дата и время (мск) замеров температур (°C)							
		5 октября 2021 г.				26 сентября 2022 г.			
		2:50	5:05	3:00	7:25	5:10	3:50	5:15	4:50
		ТС-40	ТС-2	ТС-39	ТС-93	ТС-40	ТС-2	ТС-39	ТС-93
		На берме со скальной наброской с 25.07.2020 г. On the rock berm since July 25, 2020	В пазухе с 29.09.2021 г. сбоку «СозН» In the bosom since September 29, 2021 aside of SozN	На берме со скальной наброской с 30.07.2020 г. и под «Паранджа» с 1.06.2021 г. On the rock berm since July 30, 2020 and under Paranja since June 1, 2021	В лесу почвенно-растительный слой + мох не тронут In the forest, the soil-vegetative layer + moss untouched	На берме со скальной наброской с 25.07.2020 г. On the rock berm since July 25, 2020	На пазухе с 8.10.2021 г. под «СозН» On the bosom since October 8, 2021 under «SozN»	На берме со скальной наброской с 30.07.2020 г. и под «Паранджа» с 1.06.2021 г. On the rock berm since July 30, 2020 and under Paranja since June 1, 2021	В лесу почвенно-растительный слой + мох не тронут In the forest, the soil-vegetative layer + moss untouched
Отметки горизонта, м horizon marks, m	-0,5	3,21	2,07	2,70	0,18	5,25	3,08	4,35	0,73
	-1,0	4,76	3,56	4,14	-0,08	6,53	3,37	4,88	-0,13
	-1,5	5,75	4,30	5,02	-0,30	6,66	3,08	4,79	-0,42
	-2,0	6,03	4,46	5,21	-0,40	6,28	2,34	4,41	-0,57
	-2,5	5,42	3,84	4,65	-0,70	5,40	1,46	3,59	-0,82
	-3,0	4,41	3,08	3,77	-0,89	4,21	0,54	2,62	-0,97
	-3,5	2,96	2,01	2,85	-0,95	2,70	0,01	1,71	-1,12
	-4,0	1,16	1,04	1,63	-1,15	0,93	-0,04	0,66	-1,18
	-4,5	0,03	0,79	0,37	-1,16	0,00	-0,04	0,00	-1,31
	-5,0	-0,02	0,54	0,05	-1,28	0,12	0,00	-0,06	-1,35
	-6,0	-0,15	0,35	-0,06	-1,35	0,00	0,07	-0,21	-1,35
	-7,0	-0,13	0,31	-0,38	-1,32	-0,19	0,11	-0,21	-1,37
	-8,0	-0,21	0,03	-0,38	-1,28	-0,19	0,00	-0,40	-1,35
-9,0	-0,21	0,09	-0,44	-1,23	-0,19	-0,08	-0,38	-1,30	
-10	-0,31	-0,06	-0,06	-1,26	-0,19	-0,08	-0,40	-1,14	
Сезонно-талый слой, м In the forest, the soilvegetative layer + moss untouched		4,80	9,57	5,46	0,85	6,05	3,6–4,95 с 8,05 м	4,55	0,92
ПК +		ПК 16869+75	ПК 16870+10			ПК 16869+75	ПК 16870+10		



Рис. 12. 1686 км ПК8 – 1687 км ПК1 вид против хода километров:
a – берма (март, 2021 г.); *б* – контрбанкет с бермой (октябрь, 2021 г.)

Fig. 12. 1686 km PK8 – 1687 km PK1 view vs move kilometers:
a – berm (March, 2021); *b* – counterbanket with berm (October, 2021)

В сентябре и октябре 2021 г. слева выполнено устройство проектной водоотводной канавы на участке 1686 км ПК7 – 1687 км ПК1 с укреплением дна и откосов скальным грунтом толщиной 0,3 м с применением геомембраны.

Однако, по материалам нивелирования, на данных участках ДЗП максимальные осадки на область земляного полотна продолжают и доходят до 79–111 мм за 8 мес. (с августа 2021 г. по апрель 2022 г.).

Максимальный рост раскрываемости трещин отрыва по маркам на 1686 км ПК10 слева в пазухе и справа на обочине до устройства справа скальной наброски составлял 25–31 мм с мая по сентябрь 2021 г. После устройства скальной наброски снизился до 9–12 мм с июня по сентябрь 2022 г., т. е. всего в 2,58–2,78 раза. В то же время в аналогичном случае применение ИССО «СозН» эффективнее в 2,81–3,02 раза.

В табл. 3 приведены распределение температуры грунтов под скальной наброской

контрбанкета (см. рис. 12, *б*) 1686 км ПК10 на 11 октября 2021 г. и на 11 сентября 2022 г. по замерам температур в термоскважине (ТС-3).

По данным табл. 3 скальная наброска в первый год работы никаких результатов не дала. Если на глубине 3,0–5,0 м наблюдается понижение температуры грунта, то на глубине 6,0–10,0 м произошло незначительное отепление, что привело к опусканию кровли мерзлоты с 6,53 до 7,58 м.

В период с мая по сентябрь 2021 г. на деформационном участке 1687 км ПК1-6 справа выполнены контрбанкет и берма из глыбовых скальных грунтов фракции 0,2–0,5 м на участке 1686 км ПК3–5, с термоскважинами ТС-9 и ТС-10 в полном объеме. Температурные замеры производились 15 октября 2021 г., 17 мая 2022 г. и 11 сентября 2022 г.

При замере температур 11 сентября 2022 г. выявлен срез металлической трубы на глубине 6,20–6,30 м в грунте контрбанкета насыпи, на косогоре 1:5,0.

Таблица 3. Данные замеров температуры грунтов в ТС-3 под скальной наброской
Table 3. Data of measurements of soil temperature in the Thermosquage-3 under the rock outline

№ скважины Well №	Дата замеров температур Temperature measurement date	Справа у подошвы откоса насыпи на берме с 15 октября 2021 г. в скальной наброске контрбанкета толщиной 2,30 м Right from the foot of the embankment slope on the berm since October 15, 2021 in the rock embankment of the counter banquet, 2,30 m thick										Сезонно-талый слой, м Seasonal thaw layer, m
		Отметки горизонта, м Horizon marks, m										
		-3,0	-5,0	-5,5	-6,0	-6,5	-7,0	-7,5	-8,0	-9,0	-10	
ТС-3	11 октября 2021 г. October 11, 2021	4,47	0,92	0,11	0,00	0,00	-0,14	-0,09	-0,21	-0,27	-0,31	-6,53
	11 сентября 2022 г. September 11, 2022	0,66	0,11	0,11	0,03	0,03	-0,02	0,03	-0,15	-0,19	-0,21	-7,58



а



б

Рис. 13. 1686 км ПК9-10 справа до и после срезки обочины:
 а – 27 июля 2022 г.; б – 11 октября 2022 г.

Fig. 13. 1686 km PK9-10 on the right before and after cutting the roadside:
 а – July 27, 2022, б – October 11, 2022

На участке ДЗП 1692 км ПК4+13, на оползневом косогоре 1:2,80, справа от оси первого пути 37,50 м, по термоскважине № 6 ведутся замеры температур с июня 2014 г. По проекту строительства второго пути в октябре 2018 г. на 1692 км ПК3-4 устроен контрбанкет из сортированной горной массы фракции 0,20–0,5 м (средний размер камней 0,40 м), толщиной по нормали 2,0 м и шириной 15,50 м. При замере температур 14 октября 2022 г. на этом участке выявлено сдавливание металлической трубы ТС-6 и самой термокосы. Изъять термокосу оказалось невозможно из-за опасения среза трубы.

На уровне «зеркала скольжения» мерзлота находится в пластично-мерзлом состоянии с недостаточной несущей способностью. По проекту ИЖДП контрбанкет и пазуха на оползневом косогоре перегружены скальной наброской с усугублением в первый год отепляющим эффектом. Для ускорения образования твердомерзлого грунта у подошвы скальной наброски в пазухе предлагаются дополнительные мероприятия с установкой сезонно действующих охлаждающих устройств (СОУ) в комплексе со скальной наброской [12-15].

Основными причинами низкой эффективности мероприятий, разработанных проектными институтами, являются:

1. Недостоверность инженерно-геологических изысканий. Из 19 скважин справа на обочине земляного полотна глубиной 18–22 м на 1682–1688 км пробурена всего одна – на 1685 км ПК7 в выемке.

2. Инженерно-геодезические изыскания проведены с искажением фактических отметок существующего земляного полотна.

3. Подрядной организацией для приведения к проектному очертанию обочины в местах ДЗП выполнена срезка бровки обочины бульдозером на 1686 км ПК8-10 с крутым уклоном, тем самым уплотненную обочину разрыхлили (рис. 13, а). Часть срезки грунта осталась на обочине, часть у бровки откоса (рис. 13, б), что дополнительно способствует переувлажнению самой насыпи.

По проекту от 2022 г отметки проектной головки рельса первого и второго пути на ДЗП 1686 км ПК8 – 1688 км ПК1 на оползневом косогоре с отрывами оползня необоснованно завышены от 0,25 до 0,38 м без выполнения про-



Рис. 14. Искусственное сооружение «СозН» 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1, с запада от 11 сентября 2022 г
Fig. 14. Artificial structure «SosN» 1687 km PK10 – 1688 km PK1, on the west from September 11, 2022

тиводоформационных мероприятий. Досыпка валунно-галечниковым грунтом (см. рис. 13, б) никогда не являлась охлаждающим мероприятием, а в данном случае еще и приводит к перегрузке и так уже «большого» земляного полотна.

За 2020–2022 гг. применение ИССО «СозН» (рис. 14) и затенение «Паранджа» в комплексе на 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1 показали очень высокую эффективность.

После обустройства солнцезащитного комплекса площадью 1 882,0 м² с середины октября 2022 г. приступили слева к устройству ИССО «ТМК» на участке 1687 км ПК10 – 1688 км ПК1 площадью 300 м². Строительство термокомплекса проводится над пазухой, трещинами и откосом. В данном случае решили применять гидроизоляцию в виде геомембраны, спаянной с геотекстилем, который препятствует испарению грунта, а также рулонный термоизоляционный материал толщиной 50 мм.

Заключение

Применение солнцезащитных сооружений на Новочарской дистанции пути (ПЧ-27) ВСЖД для предотвращения деградации ММГ основания земляного полотна железных дорог доказало свою высокую эффектив-

ность. Данные конструкции, не перегружая земляное полотно на оползневом косогоре, работают со дня их устройства, позволяют с высокой эффективностью снизить деградации ММГ в основании земляного полотна, которые вызывают многолетние повторяющиеся и растущие неисправности пути, а также многочисленные ограничения скорости движения поездов. При сохранении в мерзлом состоянии ММГ основания отпадает потребность в дополнительных противодеформационных мероприятиях, увеличивается пропускная способность линии и межремонтные сроки [16–18].

На основании изложенного на оползневых косогорах предлагаем запретить применение и устройство скальной наброски из глыбовых грунтов фракции 0,2–0,5 м в комплексе с СОУ.

Вместо такой конструкции на участке ДЗП 1685 км ПК10 (косогор 1:4) – 1686 км ПК5 (косогор 1:2,2) предлагаем применять слева и справа по ходу километров ИССО «СозН», «ТМК», согласно утвержденным Техническим требованиям по устройству и эксплуатации солнцезащитных навесов, предназначенных для предотвращения деградации многолетнемерзлых грунтов основания земляного полотна железных дорог (№ ЦДИ-1605 от 27 декабря 2018 г.).

Список литературы

1. Кондратьев В.Г. Активные способы укрепления основания земляного полотна на вечномерзлых грунтах. Чита : Забтранс, 2001. 100 с.
2. Кондратьев В.Г. Стабилизация земляного полотна на вечномерзлых грунтах. Чита : Полиграф-Ресурс, 2011. 176 с.
3. Кирпичников К.А., Дашинимаев З.Б., Сигачев Н.П. Устройство дренажных сооружений в районах вечной мерзлоты // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 96–101.
4. Ковенькин Д.А., Валиев Н.А. Защита от деградации многолетнемерзлых грунтов на снегозаносимых участках // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 11. С. 23–26.
5. СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах : утв. приказом Минстроя РФ № 915/пр от 30.12.2020. Введ. 2021–07–01. М. : Минстрой России, 2020. 140 с.
6. Колос А.Ф., Улицкий В.М., Городнова Е.В. Надежность земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах // Железнодорожный транспорт. 2019. № 12. С. 58–62.
7. Валиев Н.А., Кондратьев В.Г. Термокомплекс, защита от деградации оснований земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. № 1. С. 538–541.
8. Об утверждении методики определения критериев оценки надежности участков железнодорожного пути, распо-

ложенных в сложных инженерно-геологических условиях (карст, оползни, обвалы) : распоряжение ОАО «РЖД» № 237r от 6.02.2017 г.

9. Асалханова Т.Н., Карпов И.Г. Автоматизация ранжирования критериев, влияющих на безотказность железнодорожного пути // Вестник транспорта Поволжья. 2021. №2 (86). С. 26–33.

10. Капишонов В.С., Асалханова Т.Н. Факторный анализ рисков в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой // Молодая наука Сибири. 2022. №1 (15). С. 35–42.

11. Колисниченко Е.А., Григорьева О.В. Организация текущего содержания пути на основе факторного анализа на примере ПЧ-4 Красноярской железной дороги // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2012. Т. 1. С. 518–526.

12. Принятие решений при выборе конструкций и параметров сезонных охлаждающих устройств / В.А. Подвербный, А.А. Перельгина, Л.Ю. Гагарин и др. // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2019. С. 147–160.

13. Перспективы транспортного, промышленного, гражданского строительства в Тайшетском районе Иркутской области и предотвращение деградации многолетнемерзлых грунтов / В.А. Подвербный, Д.А. Ковенькин, Е.В. Филатов и др. // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2019. С. 129–147.

14. Подвербный В.А., Перельгина А.А. Принятие решения по выбору типа укрепления водоотводных и нагорных канав на основе метода идеальной точки // Транспорт Урала. 2021. № 2 (69). С. 57–62.

15. Кирпичников К.А., Дашинимаев З.Б., Баклаженко А.Г. Способ стабилизации земляного полотна в районах распространения вечной мерзлоты с применением инновационных материалов // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 92–96.

16. Чернецкая И.С. Принятие решений при выборе способов реконструкции железнодорожного пути // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2016. Т. 1. С. 543–547.

17. Чернецкая И.С., Плескач С.Т. Анализ ключевых аспектов организации ремонтно-путевых работ // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 1. С. 634–638.

18. Сулов О.А. Реорганизация системы технического обслуживания и ремонта пути // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 1. С. 11–13.

References

1. Kondrat'ev V.G. Aktivnye sposoby ukrepleniya osnovaniya zemlyanogo polotna na vechnomerzlykh gruntakh [Active methods of strengthening the foundation of the roadbed on permafrost soils]. Chita: Zabtrans Publ., 2001. 100 p.

2. Kondrat'ev V.G. Stabilizatsiya zemlyanogo polotna na vechnomerzlykh gruntakh [Stabilization of the roadbed on permafrost soils]. Chita: Poligraf-Resurs Publ., 2011. 176 p.

3. Kirpichnikov K.A., Dashinimaev Z.B., Sigachev N.P. Ustroistvo drenazhnykh sooruzhenii v raionakh vechnoi merzloty [Installation of drainage structures in permafrost areas]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2 t)* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2018, vol. 1, pp. 96 – 101.

4. Koven'kin D.A., Valiev N.A. Zashchita ot degradatsii mnogoletnemerzlykh gruntov na snegozanosimyykh uchastkakh [Protection from degradation of permafrost soils on snow-bearing areas]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2021, no. 11, pp. 23 – 26.

5. Osnovaniya i fundamenti na vechnomerzlykh gruntakh, SP 25.13330.2020 (Grounds and foundations on permafrost soils, Set of rules 25.13330.2020). Moscow: Minstro Publ., 2020. 140 p.

6. Kolos A.F., Ulitskii V.M., Gorodnova E.V. Nadezhnost' zemlyanogo polotna na mnogoletnemerzlykh gruntakh [Reliability of the roadbed on permafrost soils]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2019, no. 12, pp. 58–62.

7. Valiev N.A., Kondrat'ev V.G. Termokompleks, zashchita ot degradatsii osnovanii zemlyanogo polotna na mnogoletnemerzlykh gruntakh [Thermocomplex, protection from degradation of the foundations of the roadbed on permafrost soils]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2019, no. 1, pp. 538 – 541.

8. Rasporyazhenie ОАО «РЖД» N 237r от 6.02.2017 г. «Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya kriteriev otsenki nadezhnosti uchastkov zheleznodorozhnogo puti, raspolozhennykh v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh (karst, opolzni, obvaly)» [Order of JSC «Russian Railways» N 237r dated February 6, 2017 « On approval of the methodology for determining the criteria for assessing the reliability of railway sections located in difficult engineering and geological conditions (karst, landslides, landslips)»].

9. Asalkhanova T.N., Karpov I.G. Avtomatizatsiya ranzhirovaniya kriteriev, vliyayushchikh na bezotkaznost' zheleznodorozhnogo puti [Automation of ranking criteria affecting the reliability of a railway track]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga region], 2021, no. 2 (86), pp. 26–33.

10. Kapishonova V.S., Asalkhanova T.N. Faktorniy analiz riskov v edinoi korporativnoi avtomatizirovannoi sistema upravleniya infrastrukturoi [Factor analysis of risks in the Unified Corporate Automated Control System]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2022, no. 1 (15), pp. 35–42.

11. Kolisnichenko E.A., Grigor'eva O.V. Organizatsiya tekushchego soderzhaniya puti na osnove faktornogo analiza na primere PCh-4 Krasnoyarskoi zheleznoi dorogi [The organization of the current content of the track based on factor analysis on the example of PW-4 of Krasnoyarsk Railway]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2012, vol. 1, pp. 518–526.

12. Podverbnyi V.A., Perelygina A.A., Gagarin L.Yu., Ural'skii D.A. Prinyatie reshenii pri vybore konstruktssii i parametrov sezonnykh okhlazhdayushchikh ustroystv [Decision-making when choosing designs and parameters of seasonal cooling devices]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Materials of the III All-

Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production»]. Chita, 2019, pp. 147–160.

13. Podverbnyi V.A., Koven'kin D.A., Filatov E.V., Valiev N.A. Perspektivy transportnogo, promyshlennogo, grazhdanskogo stroitel'stva v Taishet'skom raione Irkutskoi oblasti i predotvrashchenie degradatsii mnogoletnemerzlykh gruntov [Prospects of transport, industrial, civil construction in the Taishet district of the Irkutsk region and prevention of degradation of permafrost soils]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production»]. Chita, 2019, pp. 129–147.

14. Podverbnyi V.A., Perelygina A.A. Prinyatie resheniya po vyboru tipa ukrepleniya vodootvodnykh i nagornykh kanav na osnove metoda ideal'noi tochki [Decision-making on the choice of the type of strengthening of drainage and upland ditches based on the ideal point method]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2021, no. 2 (69), pp. 57–62.

15. Kirpichnikov K.A., Dashinimaev Z.B., Baklazhenko A.G. Sposob stabilizatsii zemlyanogo polotna v raionakh rasprostraneniya vechnoi merzloty s primeneniem innovatsionnykh materialov [A method for stabilizing the roadbed in permafrost distribution areas using innovative materials]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2 t)* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2018, vol. 1, pp. 92–96.

16. Chernetskaya I.S. Prinyatie reshenii pri vybere sposobov rekonstruktsii zheleznodorozhnogo puti [Decision-making when choosing ways to reconstruct a railway track]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2016, vol. 1, pp. 543–547.

17. Chernetskaya I.S., Pleskach S.T. Analiz klyuchevykh aspektov organizatsii remontno-putevykh работ [Analysis of key aspects of the organization of repair and track works]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2017, vol. 1, pp. 634–638.

18. Suslov O.A. Reorganizatsiya sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta puti [Reorganization of the system of maintenance and repair of the track]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2021, no. 1, pp. 11–13.

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.

Валиев Новруз Али-Оглы, мастер земляного полотна, Новочарская дистанция пути Восточно-Сибирской железной дороги, пос. Новая Чара; e-mail: novruz_valiev@mail.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.

Novruz A. Valiev, master of the earthwork, Novocharskaya distance of the way of the East-Siberian Railway, Novaya Chara; e-mail: novruz_valiev@mail.ru.

Перспективы применения спектрального акустического метода неразрушающего контроля

В.В. Кашковский✉, И.И. Тихий, И.Ю. Глинский

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

✉victor.kashkovskij@mail.ru

Резюме

Одним из важных направлений обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта является своевременное изъятие вагонов из эксплуатации для производства текущего отцепочного ремонта. С целью повышения оперативности и достоверности диагностики вагонов необходим неразрушающий инструментальный контроль вагонов. В данной работе исследованы перспективы применения спектрального акустического метода неразрушающего контроля для оперативного контроля технических объектов в сфере железнодорожного транспорта. Для оценки перспектив применения этого метода были выполнены натурные исследования зависимости спектральных характеристик технических объектов от различной степени их повреждения. Проведенные испытания показали исключительную перспективность спектрального акустического метода для решения задач неразрушающего контроля железнодорожных объектов. Область применения рассмотренного метода может быть распространена не только на оперативный неразрушающий контроль вагонов, но и на входной контроль комплектующих на вагоноремонтных предприятиях, например, колесных пар. Несомненным плюсом предложенной методики является ее дешевизна. Акустический сигнал, необходимый для построения спектра, может быть записан смартфоном или сотовым телефоном любой модели и обработан впоследствии с применением любой сопрягаемой с телефоном вычислительной техники. Следующим этапом научных исследований в этом направлении предполагается накопление и изучение спектральных характеристик различных объектов железнодорожного транспорта. Уже имеется договоренность с вагоноремонтными предприятиями Восточно-Сибирской железной дороги, работники которых выразили острую заинтересованность в апробации предложенного метода.

Ключевые слова

неразрушающий контроль, комплексы неразрушающего контроля, спектральный анализ, дефектоскопия, интеллектуальный молоток

Для цитирования

Кашковский В.В. Перспективы применения спектрального акустического метода неразрушающего контроля / В.В. Кашковский, И.И. Тихий, И.Ю. Глинский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 123–135. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).123-135.

Информация о статье

поступила в редакцию: 23.07.2022 г.; поступила после рецензирования: 23.12.2022 г.; принята к публикации: 23.12.2022 г.

Prospects for the application of the spectral acoustic method of non-destructive testing

V.V. Kashkovskii✉, I.I. Tikhii, I.Yu. Glinskii

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉victor.kashkovskij@mail.ru

Abstract

One of the important ways of ensuring traffic safety is the timely withdrawal of wagons from operation for the production of current uncoupling repairs. To increase the efficiency and reliability of wagon diagnostics non-destructive instrumental control of wagons is extremely relevant and necessary. The paper investigates the prospects of using the spectral acoustic method of non-destructive testing for operational control of technical objects in transport. To assess the prospects of using this method, full-scale studies of the dependence of technical objects' spectral characteristics on varying degrees of their damage were carried out. The performed studies have shown the exceptional prospects of the spectral acoustic method for solving problems of non-destructive testing of railway transport facilities. The scope of application of the method can be extended not only to operational non-destructive testing of wagons, but also to the input control of components, for example, wheel sets, at car repair enterprises. The cheapness of the proposed methodology is captivating. The acoustic signal required to construct the spectrum can be recorded by a smartphone or a cell phone of any model, and subsequently processed using any computer technology interfaced with the phone. The next stage of scientific research in this direction is supposed to accumulate and study the spectral characteristics of various objects of railway transport. There is already an agreement with the car repair companies of the East Siberian Railway, whose employees have expressed keen interest in testing the proposed method.

Keywords

on-destructive testing, non-destructive testing complexes, spectral analysis, flaw detection, intelligent hammer

For citation

Kashkovskii V.V., Tikhii I.I., Glinskii I.Yu. Perspektivy primeneniya spektral'nogo akusticheskogo metoda nerazrushayushchego kontrolya [Prospects for the application of the spectral acoustic method of non-destructive testing]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 123–135. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).123-135.

Article info

Received: July 23, 2022; Received: December 23, 2022; Accepted for publication: December 23, 2022.

Введение

По состоянию на 1 июня 2020 г. Российская Федерация располагала более чем 1 182,6 тыс. грузовых вагонов различного назначения [1]. Для обеспечения безопасности железнодорожных грузоперевозок необходимо поддерживать этот парк в исправном состоянии. Решение этой задачи постоянно находится в поле зрения Министерства путей сообщения РФ, Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества (стран СНГ), ОАО «РЖД» и научных организаций [2–10]. Одним из направлений обеспечения безопасности движения является своевременное изъятие вагонов из эксплуатации для производства текущего отцепочного ремонта. Для этого необходим неразрушающий инструментальный контроль вагонов. Согласно ГОСТ Р 56542–2019, существуют следующие виды неразрушающего контроля: акустический; вихретоковый; магнитный; оптический; проникающими веществами; радиационный; радиоволновой; тепловой; электрический [11].

В рамках данной работы рассмотрим перспективы применения акустического вида неразрушающего контроля.

По первичному информативному параметру различают следующие методы акустического неразрушающего контроля: амплитудный; фазовый; временной; частотный; спектральный [11].

Группа компаний «СТГ» предлагает две разновидности комплексов серии «ИМК»: «ИМК-01» и «ИМКмб» (интеллектуальный молоток) [12], предназначенных для неразрушающего контроля вагонов.

Комплексы серии «ИМК» применяются во временном акустическом методе неразрушающего контроля и предназначены для проведения экспресс-контроля боковых рам тележек и цельнокатаных колес грузовых вагонов в составе поезда. Схожая методика диагности-

рования рассмотрена в [13].

Предполагается, что динамически объект контроля может быть описан комбинацией из нескольких колебательных звеньев. В основе акустических методов неразрушающего контроля лежит оценка параметров колебательного звена:

$$W(p) = \frac{K\omega_c^2}{p^2 + 2\xi\omega_c p + \omega_c^2}$$

где K – коэффициент усиления звена; $\omega_c = 2\pi F$ – круговая частота собственных незатухающих колебаний звена, рад/с; F – частота собственных незатухающих колебаний звена, Гц; ξ – декремент затухания [14–18].

В свою очередь, в основе временного акустического метода неразрушающего контроля лежит оценка длительности переходного процесса весовой функции колебательного звена:

$$g(t) = \frac{K\omega_c}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot e^{-\xi\omega_c t} \cdot \sin\left(\omega_c \sqrt{1-\xi^2} t\right), \quad (1)$$

при $0 < \xi < 1$.

Из (1) очевидно, что длительность переходного процесса функции $g(t)$, определена экспонентой:

$$e^{-\xi\omega_c t}. \quad (2)$$

Временной акустический метод исходит из того, что появление дефектов (наличие несплошности, неправильной структуры металла) в сплошной конструкции детали неизбежно приведет к уменьшению декремента затухания ξ в выражении (2) и, как следствие, к уменьшению длительности переходного процесса.

Недостатком временного акустического метода неразрушающего контроля является то, что метод не учитывает изменение частоты ω при дефектах. Известно, что на величину ω влияют различные конструктивные факторы детали (материал изготовления, форма и т. п.) и особенно ее

размер. Так, например, значение собственной частоты стержня определено выражением:

$$\omega_{cn} = \frac{\pi D n^2}{8 L^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} = C \frac{D n^2}{L^2}, \quad (3)$$

где D – диаметр стержня; L – длина стержня; ρ – плотность материала стержня; E – модуль Юнга материала стержня; $n=1, 2, 3 \dots$ – номер собственной частоты (номер резонанса или тона) [19].

В рамках одной детали или конструкции величина C в (3) постоянна. Чем больше размер детали L , тем меньше ее ω , и наоборот. Трещина в детали может разделить ее на независимые малые конструктивные элементы, для каждого из которых будет выполняться условие $L_i < L$. Поэтому частота ω каждого i -го элемента будет больше, чем частота исходной детали без дефектов. Как следствие, в выражении (2) теряется зависимость длительности переходного процесса от наличия дефектов. Можно утверждать, что именно поэтому обозначенная номенклатура объектов контроля комплексов «ИМК» с помощью «интеллектуального молотка» ограничена рамками тележек и цельнокатаных колес. На основании выполненных авторами исследований целью данной статьи является демонстрация спектрального акустического метода как более перспективного по сравнению с временным акустическим для проведения неразрушающего контроля подвижного состава.

Постановка задачи

Энергетический спектр реализации сигнала $x(t)$, $-\infty \leq t \leq +\infty$, случайной величины ζ определен выражением:

$$\Phi_{\zeta}(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \right|^2, \quad (4)$$

где $\omega_c = 2\pi f$ – круговая частота, рад/с; f – частота, Гц; $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица [20].

Для построения энергетического спектра случайного процесса (4) за ним нужно наблюдать с момента времени t от $-\infty$ в прошлом и до $+\infty$ в будущем. На практике это условие невыполнимо, поэтому в технике применяется понятие текущий энергетический спектр сигнала:

$$\Phi_{\text{ЭТ}\zeta}(\omega) = \left| \int_0^{T_H} x(t) e^{-j\omega t} dt \right|^2, \quad (5)$$

где $0 < T_H < \infty$ – конечное время наблюдения процесса.

Для получения текущего энергетического спектра контролируемого объекта (например, стяжного хомута железнодорожной цистерны), по нему наносится недеформирующий удар молотком. Затухающее звучание объекта контроля после удара представляет собой переходный процесс (1). Через микрофон оно записывается на носитель информации в виде последовательности дискретных измерений сигнала $x(t)$ с частотой 44 кГц. После завершения записи сигнала (1) выборка дискретных измерений $0 \leq x(t) \leq T_H$ используется для вычисления текущего энергетического спектра (5).

В качестве примера на рис. 1 показан переходный процесс (акустический сигнал) после удара по стяжному хомуту железнодорожной цистерны, а на рис. 2 текущий энергетический спектр этого сигнала (далее – спектр).

Спектр сигнала на рис. 2 содержит множество гармоник. При повторении данного эксперимента частоты некоторых гармоник также повторяются. Остальные гармоники характеризуют случайные шумы в процессе измерения акустического сигнала (1) объекта контроля.

Повторяющиеся частоты гармоник собственных незатухающих колебаний исследуемого объекта описаны выражением:

$$\omega_{ci} = \sqrt{\frac{k_i}{m}}, \quad (6)$$

где ω_{ci} – частота i -й гармоники собственных незатухающих колебаний исследуемой детали; m – масса объекта; k_i – коэффициент, характеризующий жесткость объекта по i -й гармонике.

Из выражений (1), (3) и (6) следует, что при возникновении внутренних дефектов в объекте контроля изменяются частоты ω_{ci} , и, возможно, их количество. Зависимость спектральных характеристик объектов контроля от характера внутренних дефектов до настоящего времени не была исследована. Однако выполнить подобные исследования на объектах железнодорожного транспорта пока не представляется возможным. Поэтому возникает актуальная научно-практическая задача исследования изменения спектра акустического сигнала объекта контроля в зависимости от его дефектов.

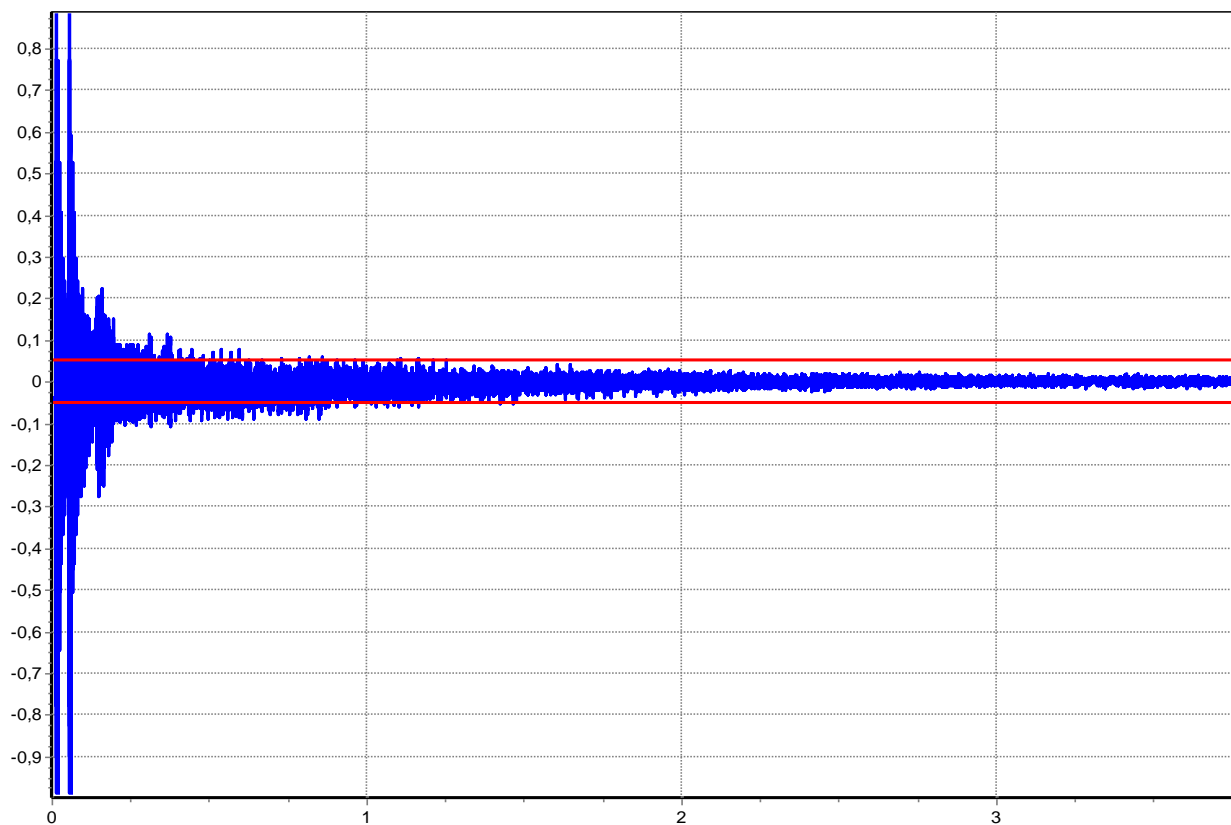


Рис. 1. Запись акустического сигнала после удара по стяжному хомуту железнодорожной цистерны
Fig. 1. Recording of an acoustic signal after hitting the coupling clamp of a railway tank

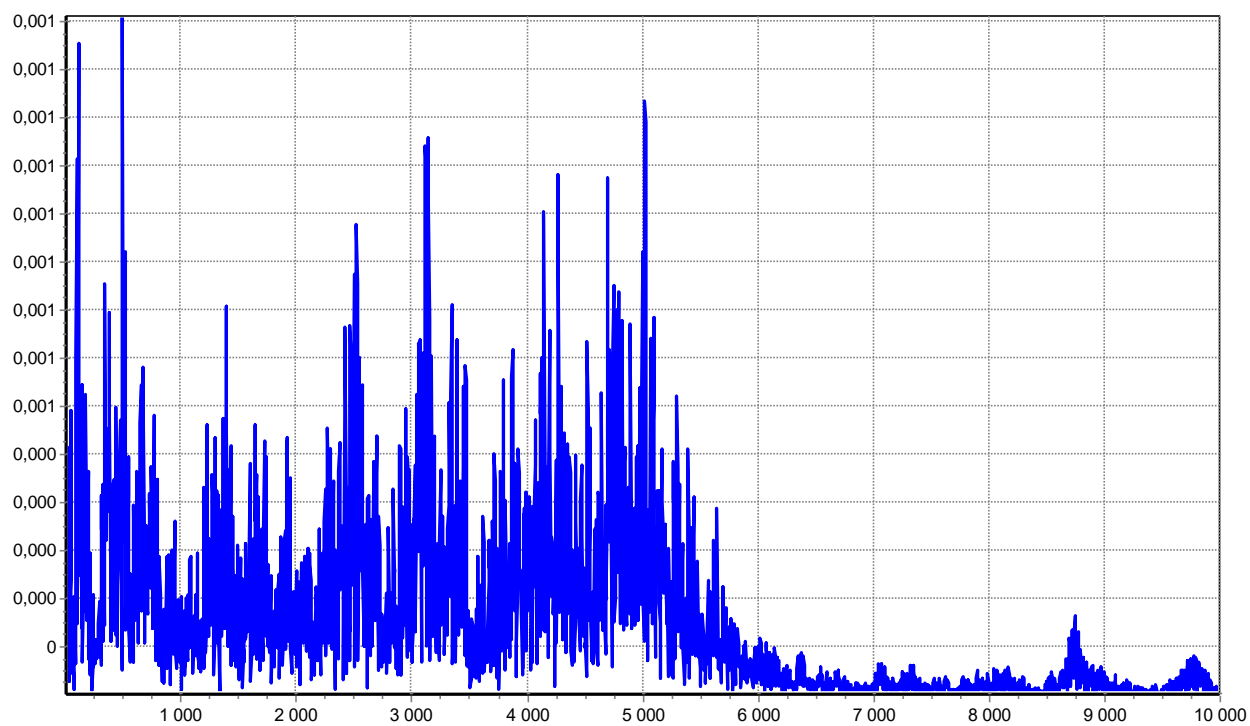


Рис. 2. Спектр акустического сигнала после удара по стяжному хомуту железнодорожной цистерны
Fig. 2. The spectrum of the acoustic signal after hitting the coupling clamp of a railway tank

Исследование изменения спектра акустического сигнала объекта контроля в зависимости от дефектов объекта контроля

Для оценки перспектив применения спектрального акустического метода неразрушающего контроля необходима оценка точности измерения гармоник спектра и влияние дефектов

объекта на его спектральную характеристику. Для решения этой задачи было проведено исследование пяти деталей типа «втулка», одна из которых показана на рис. 3. Геометрические размеры объектов контроля приведены в табл. 1.



Рис. 3. Объект контроля (исследуемая деталь № 002)

Fig. 3. Object of control (tested item No 002)

Таблица 1. Геометрические размеры деталей (мм), участвующих в исследовании

Table 1. The geometric dimensions of the parts (mm) involved in the research

Название детали Name of the part	Размеры (высота / толщина / диаметр), мм Dimensions (height/ thickness/ diameter), mm	Материал Material
001	35,7 / 3,3 / 69,8	Сталь Steel
002	31,9 / 3,9 / 101	
003	50 / 3,9 / 52,2	
004	47,1 / 10,2 / 63,1	
008	49,6 / 3,1 / 42,1	

При проведении исследования по деталям наносились удары молотком весом 0,3 кг с различной силой и направлением удара. Запись велась на микрофон с частотой дискретизации 44 кГц и разрядностью звука 16 бит. Дискретность (шаг) построения спектра – 4,398 Гц.

Исследование проводилось в три этапа. На первом этапе снимались спектральные характеристики неповрежденных деталей; на втором снимались спектральные характеристики тех же деталей, запыленных ножовочным по-

лотном; на третьем этапе глубина запыла увеличивалась с помощью углошлифовальной машины (болгарки).

На каждом этапе для исследуемых деталей проводилось по десять испытаний ударом для выделения повторяющихся гармоник и оценки статистической погрешности измерения гармоник спектра.

На рис. 4 показано наложение графиков спектров от двух ударов по исследуемой детали № 001 в исходном состоянии. Эксперимент по-

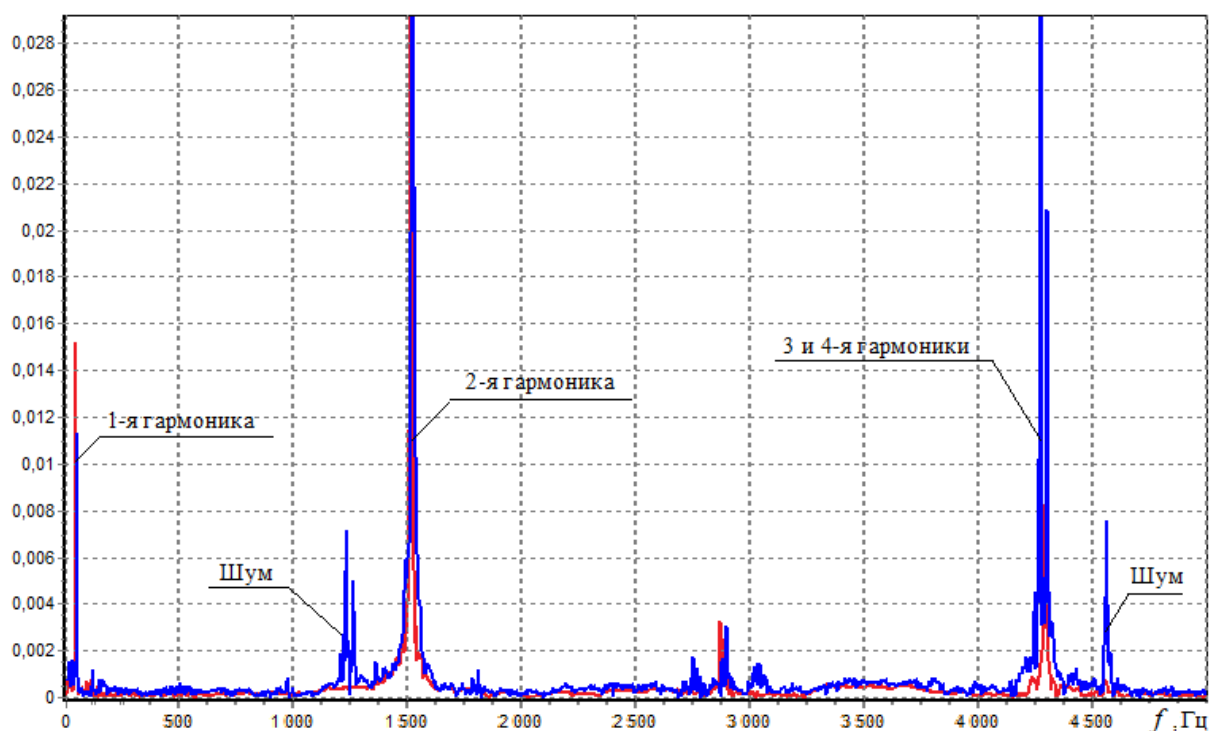


Рис. 4. Наложение спектров двух ударов по исследуемой детали № 001 в исходном состоянии:
 первая гармоника – 49,58 Гц; вторая гармоника – 1 522,91 Гц;
 третья гармоника – 4 271,66 Гц; четвертая гармоника – 4 302,45 Гц

Fig. 4. Superposition of the spectra of two impacts on the investigated part No 002 in the initial state:
 first harmonic – 49,58 Hz; second harmonic – 1 522,91 Hz; third harmonic – 4 271,66 Hz;
 forth harmonic – 4 302,45 Hz

казал четыре повторяющиеся гармоники: первая – 49,58 Гц; вторая – 1 522,91 Гц; третья – 4 271,66 Гц; четвертая – 4 302,45 Гц. Выполненные эксперименты позволили выявить интересное явление, требующее своего теоретического объяснения. Некоторые гармоники в разных опытах могут двойтаться. Так, в эксперименте, показанном на рис. 3, третья и четвертая гармоники нестабильны. Их частоты в разных опытах постоянны, но они могут появляться как совместно, так и раздельно. Причем обязательно присутствует как минимум одна из них. Эксперименты показали, что погрешность выдерживания частоты гармоник в опытах не превышает величины шага измерения, т. е. $\pm 4,398$ Гц. Это характерно для механических систем с четко выраженными частотами резонансов.

Далее для упрощения обработки полученной информации будем рассматривать отклонения частоты только первой гармоники с частотой более 500 Гц и большой амплитудой. Резонансные частоты деталей по первой значащей гармонике приведены в табл. 2.

Таблица 2. Первые значащие гармоники деталей
Table 2. First meaningful harmonics of parts

Название детали Name of the part	Частота первой гармоники, Гц First harmonic's frequency, Hz
001	1 522,91
002	753,26
003	2 833,52
004	4 698,27
008	3 378,87

На втором этапе исследовались изменения спектров, а их характеристики замерялись после деформации деталей с помощью ножовки.

Характер надпиллов указан в табл. 3. Фотография одной из поврежденных деталей показана на рис. 5. Изменение спектров деформированных деталей показаны на рис. 6–10.

Таблица 3. Характер надпилов объектов контроля на втором этапе**Table 3.** The nature of the overlays of the controlled objects at the second stage

Деталь Part	Глубина реза, мм Depth of cut, mm	Ширина реза, мм Width of cut, mm
001	17	1,5
002	15,1	1,5
003	22	1,5
004	23,2	1,5
008	24,5	1,5

Анализ спектрограмм показывает, что во всех случаях появления дефектов пропадает характерная для исправного состояния гармоника, и появляются новые, существенно отличающиеся от исходной (табл. 4). Главный положительный результат всех экспериментов состоит в том, что отклонение частот новых гармоник намного превышает случайные отклонения результатов измерения. Их невозможно с чем-либо перепутать, что полностью исключает ошибки первого и второго рода.

Таблица 4. Первые значащие гармоники исправных и деформированных деталей**Table 4.** The first significant harmonics of serviceable and deformed parts

Деталь Part	Частота исходной гармоники, Гц Initial harmonic frequency, Hz	Частота первой дефектной гармоники, Гц First deformed harmonic frequency, Hz	Частота второй дефектной гармоники, Гц Second deformed harmonic frequency, Hz
001	1 522,91	1 267,83	1 439,35
002	753,26	674,10	744,47
003	2 833,52	2 248,58	3 321,69
004	4 698,27	3 493,22	3 730,71
008	3 378,87	2 552,04	3 735,11

На третьем этапе исследования детали были существенно деформированы с помощью углошлифовальной машины (болгарки). Размеры надпилов указаны в табл. 5, фотографии деталей, поврежденных болгаркой, показаны на рис. 11.

**Рис. 5.** Фотография детали № 002, деформированной ножовкой по металлу**Fig. 5.** Photo of a part No 002 deformed with a hacksaw

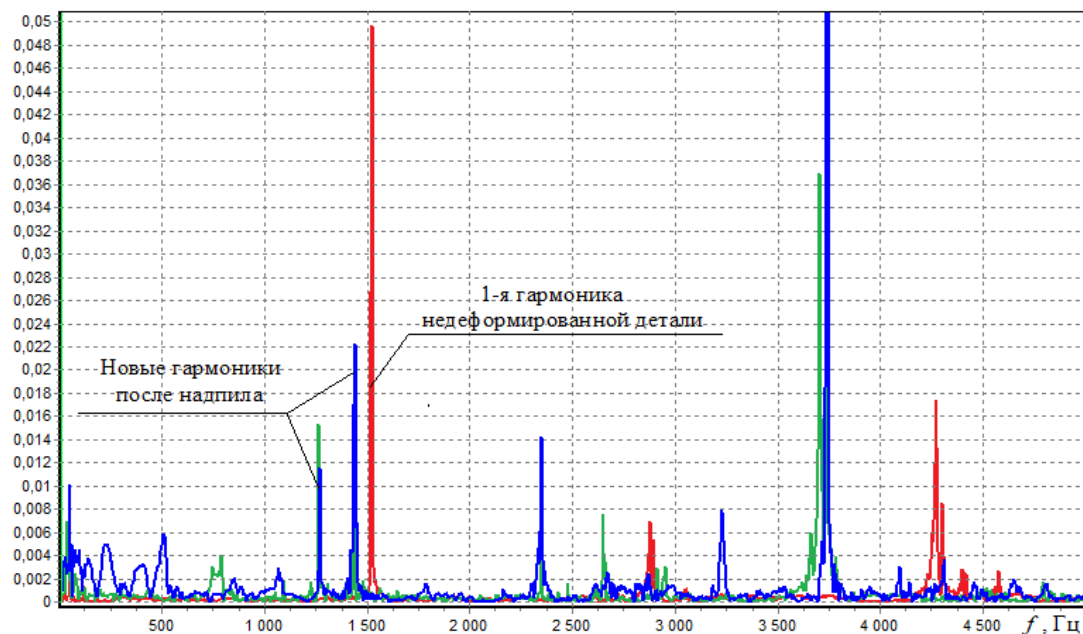


Рис. 6. Наложение спектров исследуемой детали № 001 в исходном состоянии и двух спектров после надпила ножовкой:

первая гармоника исправной детали – 1 522,91 Гц; первая гармоника деформированной детали – 1 267,83 Гц;
вторая гармоника деформированной детали – 1 439,35 Гц

Fig. 6. Superposition of the spectra of the investigated part No 001 in the initial state and two spectra after the hacksaw notch:

the first harmonic of a serviceable part is 1 522,91 Hz; the first harmonic of a deformed part is 1 267,83 Hz;
the second harmonic of a deformed part is 1 439,35 Hz

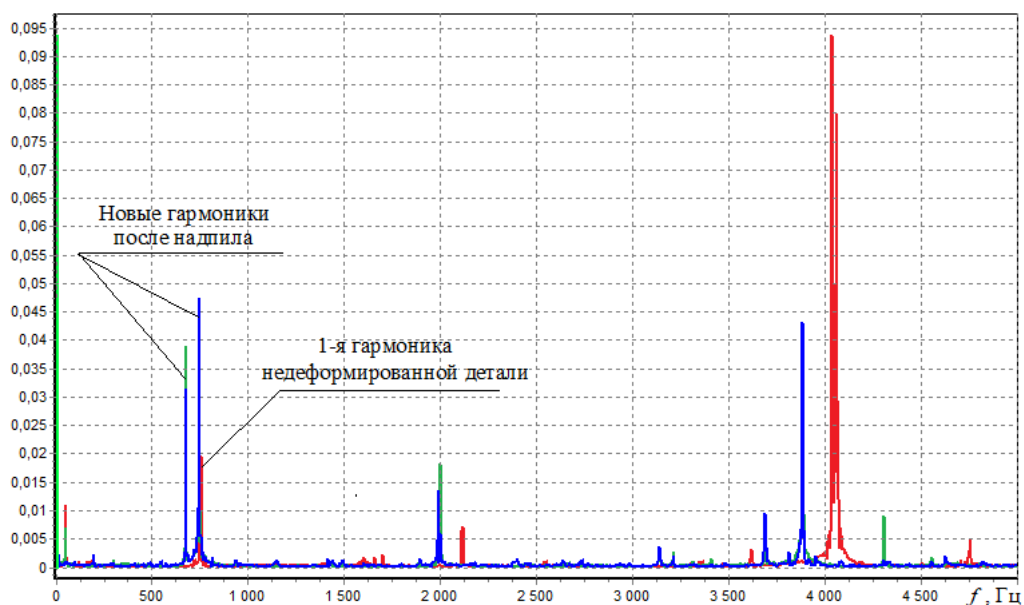


Рис. 7. Наложение спектров исследуемой детали № 002 в исходном состоянии и двух спектров после надпила ножовкой:

первая гармоника исправной детали – 753,26 Гц; первая гармоника деформированной детали – 674,10 Гц;
вторая гармоника деформированной детали – 744,47 Гц

Fig. 7. Superposition of the spectra of the investigated part No 002 in the initial state and two spectra after the hacksaw notch:

the first harmonic of a serviceable part is 753,26 Hz; the first harmonic of a deformed part is 674,10 Hz;
the second harmonic of a deformed part is 744,47 Hz

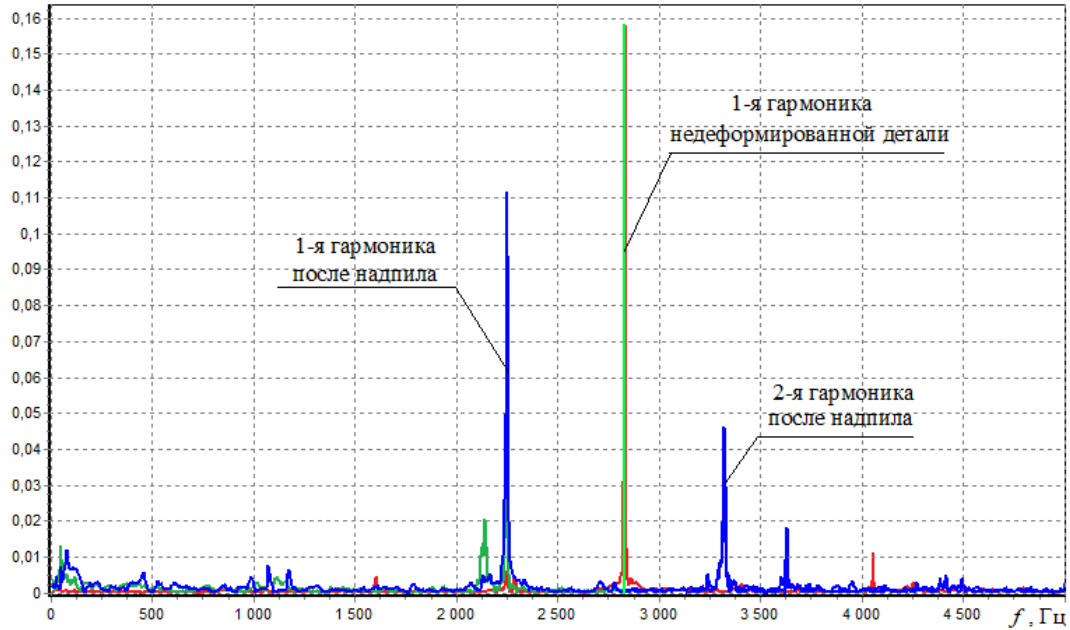


Рис. 8. Наложение спектров исследуемой детали № 003 в исходном состоянии и двух спектров после надпила ножовкой:

первая гармоника исправной детали – 2 833,52 Гц; первая гармоника деформированной детали – 674,10 Гц;
 вторая гармоника деформированной детали – 3 321,69 Гц

Fig. 8. Superposition of the spectra of the investigated part No 003 in the initial state and two spectra after the hacksaw notch:

the first harmonic of a serviceable part is 2 833,52 Hz; the first harmonic of a deformed part is 674,10 Hz;
 the second harmonic of a deformed part is 3 321,69 Hz

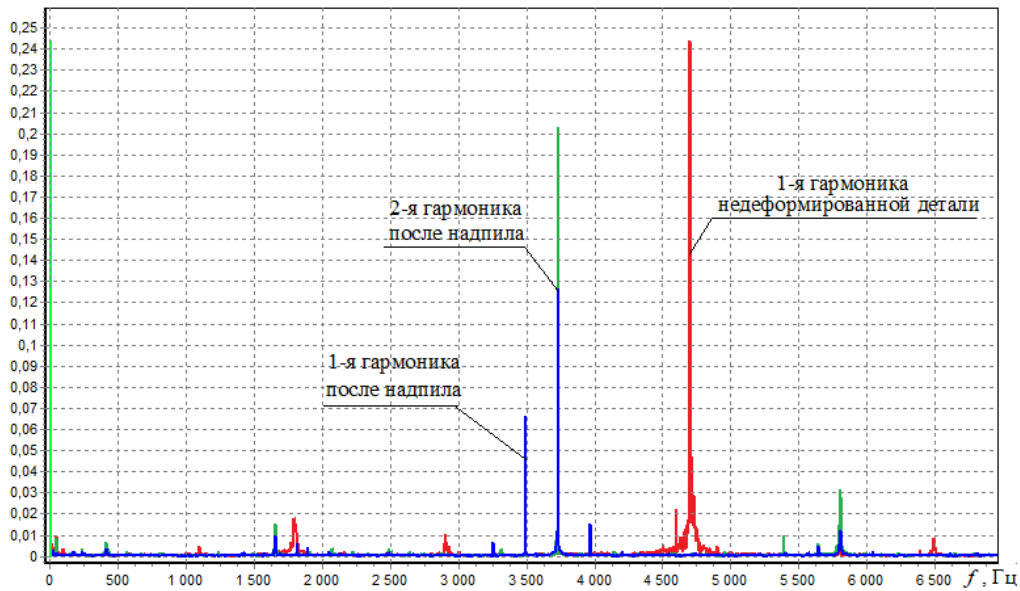


Рис. 9. Наложение спектров исследуемой детали № 004 в исходном состоянии и двух спектров после надпила ножовкой:

первая гармоника исправной детали – 4 698,27 Гц; первая гармоника деформированной детали – 3 493,22 Гц;
 вторая гармоника деформированной детали – 3 730,71 Гц

Fig. 9. Superposition of the spectra of the investigated part No 004 in the initial state and two spectra after the hacksaw notch:

the first harmonic of a serviceable part is 4 698,27 Hz; the first harmonic of a deformed part is 3 493,22 Hz;
 the second harmonic of a deformed part is 3730.71 Hz

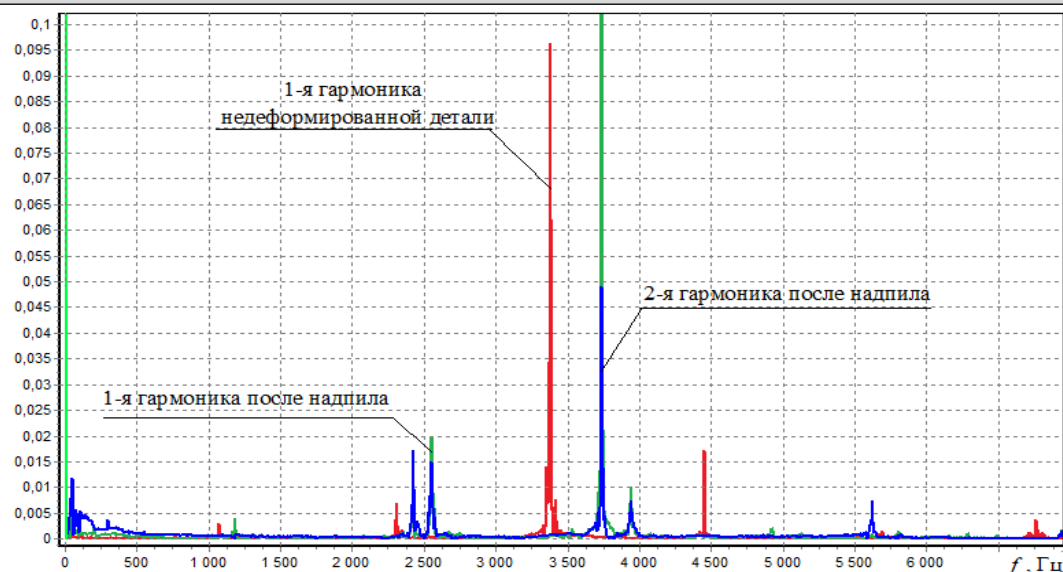


Рис. 10. Наложение спектров исследуемой детали № 004 в исходном состоянии и двух спектров после надпила ножовкой:

первая гармоника исправной детали – 3 378,87 Гц; первая гармоника деформированной детали – 2 552,04 Гц; вторая гармоника деформированной детали – 3 735,11 Гц

Fig. 10. Superposition of the spectra of the investigated part No 004 in the initial state and two spectra after the hacksaw notch:

the first harmonic of a serviceable part is 3 378,87 Hz; the first harmonic of a deformed part is 2 552,04 Hz; the second harmonic of a deformed part is 3 735,11 Hz

Существенные деформации объектов контроля, вызванные надпиллом болгаркой, во всех случаях привели к радикальному изменению спектров. Отмечается появление множества гармоник с большой амплитудой, существенно искажающих исходный спектр (см. рис. 4 и рис. 12). Большое число вновь появившихся гармо-

ник иногда даже вызывает затруднение в выборе – какую из них считать первой, а какую второй. Но в целом изменения спектров и их характеристик таковы, что перепутать исправное и деформированное состояние объектов контроля невозможно. Обобщенные результаты экспериментов приведены в табл. 6.

Таблица 5. Характер надпила исследуемых объектов контроля на третьем этапе
Table 5. The nature of the notch of the studied objects under control at the third stage

Деталь Part	Глубина реза, мм Depth of cut, mm	Ширина реза, мм Width of cut, mm
001	24,5	3,5
002	32	3,5
003	27	3,5
004	44	3,5
008	41	3,5

Таблица 6. Первые значащие гармоники исправных и деформированных деталей на третьем этапе
Table 6. The first meaningful harmonics of serviceable and deformed parts at the third stage

Деталь Part	Частота исходной гармоники, Гц Initial harmonic frequency, Hz	Частота первой дефектной гармоники, Гц First deformed harmonic frequency, Hz	Частота второй дефектной гармоники, Гц Second deformed harmonic frequency, Hz
001	1 522,91	581,74	1 861,56
002	753,26	581,74	1 025,94
003	2 833,52	1 725,22	2 121,04
004	4 698,27	2 169,42	3 871,44
008	3 378,87	1 505,32	3 330,49



Рис. 11. Фотография детали № 002, деформированной болгаркой
 Fig. 11. Photograph of a part deformed by an angle grinder

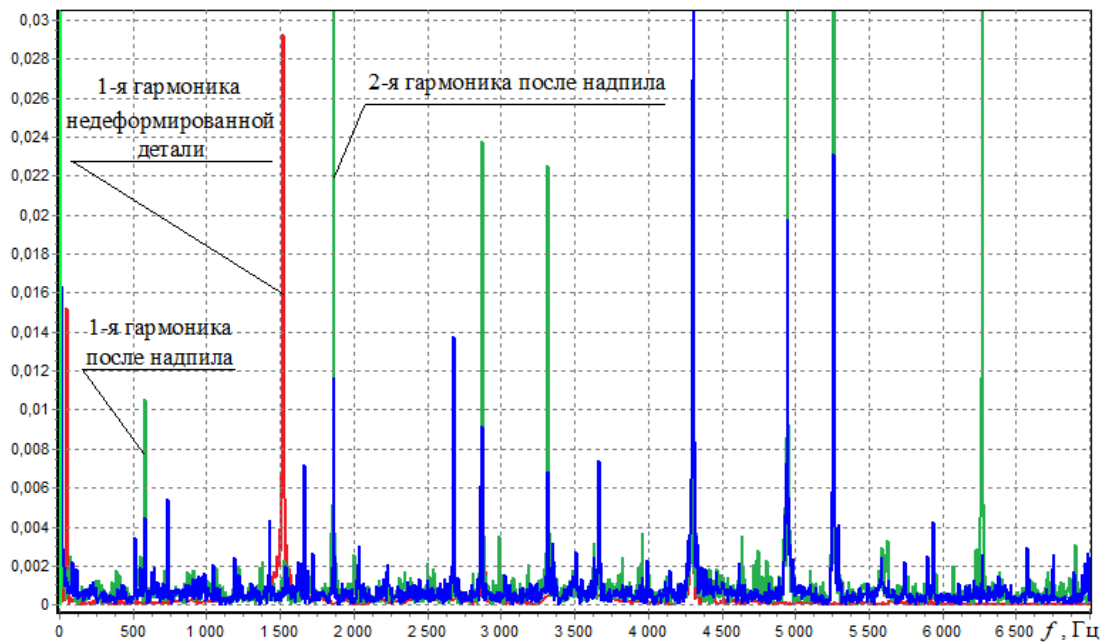


Рис. 12. Наложение спектров исследуемой детали № 001 в исходном состоянии и двух спектров после надпила ножовкой:

первая гармоника исправной детали 1 522,91 Гц; первая гармоника деформированной детали – 581,74 Гц;
 вторая гармоника деформированной детали – 1 861,56 Гц

Fig. 12. Superposition of the spectra of the investigated part No 001 in the initial state and two spectra after the hacksaw notch:

the first harmonic of a serviceable part is 1 522,91 Hz; the first harmonic of a deformed part is 581,74 Hz;
 the second harmonic of a deformed part is 1 861,56 Hz

Заключение

Выполненные исследования показали исключительную перспективность спектрального акустического метода для решения задач не-

разрушающего контроля объектов железнодорожного транспорта. Область его применения может быть распространена не только на оперативный неразрушающий контроль вагонов,

но и на входной контроль комплектующих на вагоноремонтных предприятиях, например, колесных пар. Подкупает дешевизна предложенной методики. Акустический сигнал (1) может быть записан смартфоном или сотовым телефоном любой модели и обработан впоследствии с применением любой сопрягаемой с телефоном вычислительной техники.

Следующий этап исследований в этом направлении – накопление и изучение спектральных характеристик объектов железнодорожного транспорта. Имеется договоренность с вагоноремонтными предприятиями Восточно-Сибирской железной дороги, которые выразили острую заинтересованность в апробации предложенного метода.

Список литературы

1. Сеть РЖД испытывает давление профицита вагонного парка // РЖД Партнер.ру : сайт. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/opinions/set-rzhd-isytyvaet-davlenie-profitsita-vagonnogo-parka/> (Дата обращения: 15.06.2022).
2. Об изменении периодичности плановых видов ремонта грузовых вагонов колеи 1520 мм : приказ Министерства путей сообщ. Рос. Федерации от 18.12.1995 г. № 7ЦЗ. М. : МПС РФ, 1995. 2 с.
3. О внедрении новой системы ремонта грузовых вагонов : указание Министерства путей сообщ. Рос. Федерации 5.01.1999 г. № К-2у (Д). М. : МПС РФ, 1999. 2 с.
4. О совершенствовании системы ремонта и технического обслуживания грузовых вагонов : указание Министерства путей сообщ. Рос. Федерации от 6.12.1999 г. № К-2746у. М. : МПС РФ, 1999. 2 с.
5. О введении в действие новой редакции правил эксплуатации грузовых вагонов при системе технического обслуживания и ремонта с учетом фактически выполненного объема работ на железных дорогах Российской Федерации : указание Министерства путей сообщ. Рос. Федерации от 17.04.2001 г. № П-671у. М. : МПС РФ, 2001. 17 с.
6. Правила эксплуатации и полномерного учета собственных грузовых вагонов : утв. на 29 заседании Совета по железнодорожному транспорту от 19.06.2001. Введ. 2001–09–01. М., 2001. 13 с.
7. Руководство по капитальному ремонту грузовых вагонов : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества : протокол № 54 от 18-19 мая 2011 г. 136 с.
8. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества : протокол № 57 от 16-17 окт. 2012 г. 17 с.
9. О системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов : распоряжение ОАО «РЖД» от 29 декабря 2012 г. № 2759р. М. : ОАО «РЖД», 2012. 18 с.
10. Об утверждении руководства по текущему отцепочному ремонту (ТР-1) : распоряжение ОАО «РЖД» № 2633/р от 07.12.2018 г. Введ. 2019–01–01. М. : ОАО «РЖД», 2018. 28 с.
11. ГОСТ Р 56542-2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Введ. 2020–11–01. М. : Стандартинформ, 2019. 12 с.
12. Интеллектуальный молоток контроля («ИМК») // Clean technologies group : сайт: <https://ctg.su/produkcija/oborudovanie/kompleksy-dlya-vysokodostovernogo-nerazrushayushhego-kontrolya/seriya-imk-intellektualnye-molotki-kontrolya> (Дата обращения: 15.06.2022).
13. NDIS 2421. Recommended practice for in situ monitoring of concrete structures by acoustic emission. The Japanese Society for non-Destructive Inspection, 2000.
14. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientist and engineers. New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. 831 p.
15. A Proposed Standard for Evaluating Structural Integrity of Reinforced Concrete Beams by Acoustic Emission / S. Yuyama, T. Okamoto, M. Shigeishi et al. // Acoustic emission Standards and Technology Update edited / SJ.Vahaviolos ; American Society for Testing and Materials. STP1353. 1999. P. 25–40.
16. Кочетков Ю.А. Основы автоматики авиационного оборудования. М. : ВВИА, 1995. 574 с.
17. Муромцев Ю.Л. Основы автоматики и системы автоматического управления. Ч. 1. Тамбов : Тамб. ГТУ, 2008. 96 с.
18. Серебряков А.С., Семсенов Д.А., Чернов Е.А. Автоматика. М. : Юрайт, 2021. 477 с.
19. Смирнова О.И., Попов П.В., Федоров Г.Е. Измерение модуля Юнга методом акустического резонанса : лаб. работа по курсу «Общая физика». URL: https://mipt.ru/education/chair/physics/S_I/lab/rodwaves_148.pdf (Дата обращения: 15.06.2022).
20. Тихий И.И., Кашковский В.В. Испытания и эксплуатация авиационной техники. Ч. 1. Иркутск : ИВВАИУ, 2009. 308 с.

References

1. Set' RZhd ispytyvaet davlenie profitsita vagonnogo parka (Elektronnyi resurs) [The Russian Railways network is under pressure from the surplus of the wagon fleet (Electronic resource)]. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/opinions/set-rzhd-isytyvaet-davlenie-profitsita-vagonnogo-parka/> (Accessed June 15, 2022).
2. Prikaz ministerstva putei soobshcheniya RF ot 18 dekabrya 1995 g. № 7TsZ «Ob izmenenii periodichnosti planovykh vidov remonta gruzovykh vagonov kolei 1520 mm» [Order of the ministry of railways of the Russian Federation No. 7CZ dated December 18, 1995. «On changing the frequency of planned types of repairs of freight wagons of 1520 mm gauge»].
3. Ukazanie Ministerstva putei soobshcheniya RF ot 5.01.1999 g «O vnedrenii novoi sistemy remonta gruzovykh vagonov». [Instruction of the Ministry of railways of the Russian Federation, dated January 5, 1999 no. k-2u (d) «On the introduction of a new system for the repair of freight wagons»].

4. Ukazanie Ministerstva putei soobshcheniya RF ot 6.12.1999 g. no K-2746u «O sovershenstvovanii sistemy remonta i tekhnicheskogo obsluzhivaniya gruzovykh vagonov» [Instruction of the ministry of railways of the Russian Federation dated December 6, 1999, no K-2746u «On improving the system of repair and maintenance of freight wagons»].

5. Ukazanie Ministerstva putei soobshcheniya RF ot 17.04.2001 g. № P-671u «O vvedenii v deistvie novoi redaktsii pravil ekspluatatsii gruzovykh vagonov pri sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta s uchedom fakticheski vypolnennogo ob"ema rabot na zheleznykh dorogakh Rossiiskoi Federatsii» [Instruction of the ministry of railways of the Russian Federation no P-671u, dated April 17, 2001 «On the introduction of a new edition of the rules for the operation of freight wagons in the maintenance and repair system, taking into account the amount of work actually performed on the railways of the Russian Federation»].

6. Pravila ekspluatatsii i polnomernogo ucheta sobstvennykh gruzovykh vagonov. Utverzhdeny na 29 zasedanii Soveta po zhelezno-dorozhnomu transportu. Data vvedeniya v deistvie: 01.09.2001 g. [Rules of operation and measurement of own freight wagons. Approved for the 29th meeting of the Railway Transport Council. Effective date: September 01, 2001].

7. Rukovodstvo po kapital'nomu remontu gruzovykh vagonov. Utverzhdeno Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva, protokol № 54 ot «18-19» maya 2011 g. [Manual for the overhaul of freight cars. Approved by: The Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol No. 54 of May 18-19, 2011], 136 p.

8. Polozhenie o sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta gruzovykh vagonov, dopushchennykh v obrashchenie na zheleznodorozhnye puti obshchego pol'zovaniya v mezhdunarodnom soobshchenii. Utverzhdeno Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva Protokol № 57 ot «16-17» oktyabrya 2012 g [Regulations on the system of maintenance and repair of freight cars admitted to circulation on public railways in international traffic. Approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States Protocol No. 57 of October 16-17, 2012].

9. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 29 dekabrya 2012 g. № 2759r «O sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta gruzovykh vagonov» [Order of the JSC «Russian Railways» No. 2759r dated December 29, 2012 «On the system of maintenance and repair of freight wagons»].

10. Rasporyazhenie OAO «RZhD» N 2633/r ot 07.12.2018 g «Ob utverzhdenii rukovodstva po tekushchemu ottsepochnomu remontu (TR-1)». [Order of JSC «Russian Railways» no 2633/r dated December 07, 2018 «Manual for current uncoupling repair (TR-1)»].

11. GOST R 56542-2019. Kontrol' nerazrushayushchii. Klassifikatsiya vidov i metodov [State Standard R 56542-2019. Non-destructive testing. Classification of types and method]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 12 p.

12. Intellektual'nyi molotok kontrolya («IMK») (Elektronnyi resurs) [Intelligent Control Hammer («ICH») (Electronic resource)]. Available at: <https://ctg.su/produkcija/oborudovanie/kompleksy-dlya-vysokodostovernogo-nerazrushayushhego-kontrolya/seriya-imk-intellektualnye-molotki-kontrolya> (Accessed June 15, 2022).

13. NDIS 2421. Recommended practice for in situ monitoring of concrete structures by acoustic emission. The Japanese Society for non-Destructive Inspection (NDIS). 2000.

14. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientist and engineers. New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. 831 p.

15. Yuyama S., Okamoto T., Shigeishi M., Ohtsu M., Kishi T. A Proposed Standard for Evaluating Structural Integrity of Reinforced Concrete Beams by Acoustic Emission // Acoustic emission Standards and Technology Update edited by S.J.Vahaviolos, American Society for Testing and Materials. STP1353, 1999, pp. 25–40.

16. Kochetkov Yu.A. Osnovy avtomatiki aviatsionnogo oborudovaniya [Fundamentals of aviation equipment automation]. Moscow: VVIA Publ., 1995. 574 p.

17. Muromtsev Yu.L. Osnovy avtomatiki i sistemy avtomaticheskogo upravleniya. Chast' 1 [Fundamentals of automation and automatic control systems. Part 1]. Tambov: Tambov GTU Publ., 2008. 96 p.

18. Serebryakov A.S., Semenov D.A., Chernov E.A. Avtomatika [Automotion]. Moscow: Yurait Publ., 2021. 477 p.

19. Smirnova O.I., Popov P.V., Fedorov G.E. Laboratornaya rabota po kursu «Obshchaya fizika» «Izmerenie modulya Yunga metodom akusticheskogo rezonansa» (Elektronnyi resurs) [Laboratory work on the course «General Physics» «Measurement of Young's modulus by acoustic resonance method» (Electronic resource)]. Available at: https://mpt.ru/education/chair/physics/S_I/lab/rodwaves_148.pdf (Accessed June 15, 2022).

20. Tikhii I.I., Kashkovskii V.V. Ispytaniya i ekspluatatsiya aviatsionnoi tekhniki. Chast' 1 [Testing and operation of aviation equipment. Part 1]. Irkutsk: IVVAIU Publ., 2009. 308 p.

Информация об авторах

Кашковский Виктор Владимирович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, доцент, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: viktor.kashkovskij@mail.ru.

Тихий Иван Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: tiviv@list.ru.

Глинский Игорь Юрьевич, магистрант кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: ig.1906@yandex.ru.

Information about the authors

Victor V. Kashkovskii, Doctor of Engineering Science, Senior Researcher, Associate Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: viktor.kashkovskij@mail.ru.

Ivan I. Tikhii, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Physics, mechanics and instrument engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: tiviv@list.ru.

Igor Yu. Glinskii, Master Student of the Department of Information systems and information security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: ig.1906@yandex.ru.

Совершенствование системы контроля целостности электрической цепи электропневматических тормозов в пассажирском поезде железнодорожного транспорта

А.Д. Родченко, О.С. Томилова✉, П.Б. Сергеев, В.А. Михеев

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

✉motovilova@yandex.ru

Резюме

Система контроля электрической цепи электропневматических тормозов, установленная на локомотиве, оповещает машиниста только об ее нарушении, но не указывает точного места, где в электрической цепи возникла неисправность. Для сокращения времени поиска неисправности и, как следствие, уменьшения времени простоя вагонов в период ремонта электропневматических тормозов предлагается устройство, расширяющее функции существующей системы контроля целостности электрической цепи, дополняющее ее в части точного определения номера вагона в поезде, где произошел обрыв проводов, короткое замыкание или возникла другая неисправность. В разработанном устройстве основным источником получения информации о состоянии электрической цепи и режимах работы оборудования тормозной магистрали при движении пассажирского поезда являются датчики напряжения и тока. При движении поезда сигналы с датчиков поступают на электронное устройство, которое обрабатывает получаемую информацию, сравнивает ее с записанными в постоянную память микроконтроллера значениями напряжений и тока, соответствующими исправному состоянию электрооборудования электропневматических тормозов в различных режимах работы тормозной системы. При возникновении неисправности электронное устройство формирует выходной сигнал. В сигнале зашифрована информация о номере вагона и виде возникшей неисправности. Сформированный сигнал поступает на передающее устройство и по каналам связи передается на приемное устройство, установленное в кабине машиниста локомотива. По свечению светодиодов, расположенных на лицевой панели приемного устройства, можно определить номер вагона и вид неисправности в электрооборудовании электропневматических тормозов пассажирского поезда.

Ключевые слова

электропневматические тормоза, система контроля целостности электрической цепи, пассажирский вагон, оборудование тормозной магистрали, датчики напряжения и тока, микроконтроллер, локомотив

Для цитирования

Совершенствование системы контроля целостности электрической цепи электропневматических тормозов в пассажирском поезде железнодорожного транспорта / А.Д. Родченко, О.С. Томилова, П.Б. Сергеев, В.А. Михеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 136–143. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).136-143.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 20.12.2022 г.; принята к публикации: 22.12.2022 г.

Improving the control system of the electrical circuit integrity of electropneumatic brakes in a railway passenger train

A.D. Rodchenko, O.S. Tomilova✉, P.B. Sergeev, V.A. Mikheev

Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

✉motovilova@yandex.ru

Abstract

The control system of the electric circuit of electropneumatic brakes installed on the locomotive notifies the driver only of its violation, but does not indicate the exact place where a malfunction occurred in the electric circuit. To reduce the time of troubleshooting, to reduce the downtime of wagons during the repair of the electropneumatic brake, a device is proposed that extends the functions of the existing electrical circuit integrity monitoring system to accurately determine the number of the wagon in the train in which there was a problem with the wires, a short circuit or another malfunction occurred. In the developed device, the main source of information about the state of the electrical circuit and the operating modes of the brake line equipment during the movement of a passenger train are voltage and current sensors. When the train is moving, the signals from the sensors are sent to an electronic device that processes the information received, compares it with the voltage and current values recorded in the permanent memory of the microcontroller corresponding to the serviceable condition of the electrical equipment of the electropneumatic brake in various modes of operation of the braking system. When the train is moving, the signals from the sensors are sent to an electronic device that processes the information received, compares it with the voltage and current values recorded in

the permanent memory of the microcontroller corresponding to the serviceable condition of the electrical equipment of the electropneumatic brake in various modes of operation of the braking system. If a malfunction occurs in the electrical equipment of the electropneumatic brake, the electronic device generates an output signal. The signal contains encrypted information about the number of the wagon and the type of malfunction that occurred. The generated signal enters the transmitting device and is transmitted via communication channels to the receiving device installed in the cab of the locomotive driver. By the glow of the LEDs located on the front panel of the receiving device, it is possible to determine the number of the wagon and the type of malfunction in the electrical equipment of the electropneumatic brake of a passenger train.

Keywords

electropneumatic brakes, electrical circuit integrity monitoring system, passenger wagon, brake line equipment, voltage and current sensors, microcontroller, locomotive

For citation

Rodchenko A.D., Tomilova O.S., Sergeev P.B., Mikheev V.A. Sovershenstvovanie sistemy kontrolya tselnostnosti electriceskoi tsepi electropnevmaticheskikh tormozov v passazhirskom poezde zheleznodorozhnogo transporta [Improving the control system of the electrical circuit integrity of electropneumatic brakes in a railway passenger train]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 136–143. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).136-143.

Article Info

Received: October 14, 2022; Revised: December 20, 2022; Accepted: December 22, 2022.

Введение

Безаварийная и безотказная работа подвижного состава, узлов и устройств железнодорожной техники – это основа для обеспечения высокого уровня пропускной и провозной способностей железных дорог, что является приоритетным направлением развития железнодорожного транспорта. От количества произошедших отказов деталей и узлов вагона напрямую зависит оценка качества работы [1].

Отказы тормозного оборудования пассажирских вагонов происходят из-за неисправности следующих узлов: арматура, воздухораспределитель, воздухопровод, электрическая часть рукава, рычажная тормозная передача, электровоздухораспределитель и др.

Рассмотрению актуального перечня вопросов надежности эксплуатации и эффективности работы автотормозного оборудования на железнодорожном подвижном составе посвя-

Распределение отказов оборудования пассажирских вагонов
Distribution of passenger wagons brake failures

Причина отказа Cause of failure	Доля случаев Proportion of cases	Средняя наработка, тыс. км ² Average operating time, thousand km ²	
		До отказа Up to failure	На отказ Into failure
Тормозное оборудование Brake equipment	26 %	107,10	246,0
Система отопления Heating system	4 %	2 561,10	5 883,60
Система водоснабжения Water supply system	4 %	2 561,10	5 883,60
Тележка Bogie	4 %	107,10	246,0
Кузов Body	7 %	73,50	139,00
Электрооборудование Electrical equipment	7 %	73,50	139,00
Ударно-тяговые устройства Shock-traction devices	7 %	731,70	1 681,00
Букса Buxa	15 %	107,10	246,0
Колесная пара Wheel set	22 %	107,10	246,0
Прочее Other	4 %	186,30	428,00

щены работы таких авторов, как Э.И. Галай, П.К. Рудов, А.В. Зяблов, А.И. Быков, С.В. Петров, Г.В. Райков.

В указанных работах авторами выполнен критический анализ показателей эксплуатации тормозного оборудования вагонов, организации их контроля и диагностики, приводятся данные статистики отказов оборудования по сети дорог, в том числе используемые в настоящей статье (табл.) [2, 3].

Как видно из приведенных данных, чаще всего поломкам в пассажирских вагонах подвержены тормоза и электрооборудование, а также колесные пары.

При этом обзор имеющихся научных работ обращает внимание на отсутствие отдельного рассмотрения вопросов контроля именно электропневматического тормозного оборудования.

К электропневматическим тормозам (ЭПТ) пассажирских вагонов предъявляются высокие требования в части их безотказности. А из-за того, что пробег пассажирского состава существенно меньше грузового, то и количество отказов тормозного оборудования меньше. Однако периодически возникают так называемые отказы технических средств ЭПТ пассажирских вагонов [4].

Одним из основных лимитирующих факторов в контексте надежности ЭПТ является повреждение электрической части рукава

№ 369. Наиболее вероятное место обрыва проводов – межвагонное соединение (между головками соединительных рукавов) [5].

Общие сведения о тормозных средствах подвижного состава

Одним из важнейших узлов железнодорожного подвижного состава, отвечающих за безопасность движения, являются тормозные системы (тормоза), которые предназначены для искусственного увеличения сил сопротивления движению вплоть до полной остановки подвижного состава и удержания его на месте. Классификация тормозов подвижного состава представлена на рис. 1 [6].

Наибольшее распространение на сети железных дорог Российской Федерации в пассажирском подвижном составе получили ЭПТ.

ЭПТ имеют следующие преимущества перед пневматическими:

- тормозной путь сокращается на 30 %;
- обеспечивается одновременность срабатывания тормозов за счет уменьшения времени заполнения тормозных цилиндров сжатым воздухом;
- достигается плавность торможения из-за снижения продольно-динамических усилий в поезде;
- за счет ступеней торможения в электропневматическом тормозе выполняется быстродействующий ступенчатый отпуск и по-

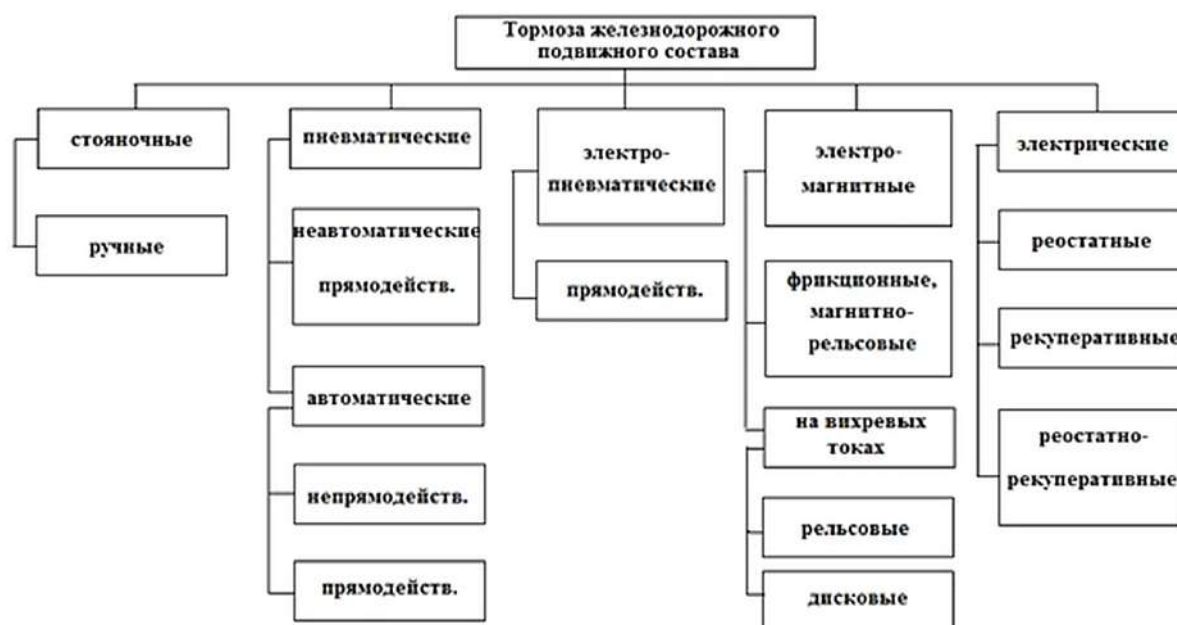


Рис. 1. Классификация тормозов подвижного состава

Fig. 1. Classification of train brakes

является возможность регулирования тормозной силы [7, 8].

В настоящей статье объектом исследования выбрана электрическая часть управления ЭПТ пассажирских поездов, а именно, система диагностирования целостности электрических цепей управления и контроля в режимах тяги, выбега и торможения.

Для пассажирских поездов принята двухпроводная электрическая цепь (провод № 1 – рабочий, провод № 2 – контрольный, обратным проводом являются рельсовые пути), позволяющая обеспечивать подачу напряжения на электрическую часть тормоза.

В пассажирском вагоне установлены трехтрубные клеммные коробки усл. № 317, к которым подключается электровоздухораспределитель, а по концам вагона устанавливаются двухтрубные клеммные коробки усл. № 316, к которым присоединяется кабель междувагонных соединений. В хвостовом вагоне контрольный и рабочий провода соединяются между собой, образуя целостность электрической цепи [9].

Технические решения, повышающие надежность элеткропневматических тормозов поезда

Для повышения надежности ЭПТ при скорости поезда не более 120 км/ч применяют дублированное питание, при котором с помощью тумблера замыкают рабочий и контрольный провод, обеспечивая подачу напряжения на электровоздухораспределитель по двум проводам. Работа тормозной системы поезда не

прекращается даже в случае обрыва одного из проводов [10, 11].

Причины неудовлетворительной работы электропневматических тормозов поезда

Наиболее частыми признаками некачественной работой ЭПТ являются следующие:

- снижение напряжения источника питания (менее 45 В) в режимах работы торможения;
- уменьшение показаний амперметра более чем на 20 % в режиме «Перекрыша»;
- снижение эффективности работы тормозов;
- выявление недостаточной плавности торможения;
- отсутствие свечения сигнальных ламп или несоответствие положения ручки крана машиниста [6, 12].

При возникновении неисправности в электрической цепи ЭПТ необходимо остановить поезд, отключить на пульте управление ЭПТ и его блок питания, пройти вдоль состава, осмотреть междувагонные соединительные рукава. Если неисправность не найдена, следует перейти на пневматический тормоз и продолжать движение [13, 14].

Применяемый способ отыскания места неисправности в электрической цепи ЭПТ пассажирского поезда занимает длительное время.

Описание разработанного устройства

Для сокращения времени отыскания места и вида неисправности в электропневматической тормозной системе пассажирского поезда

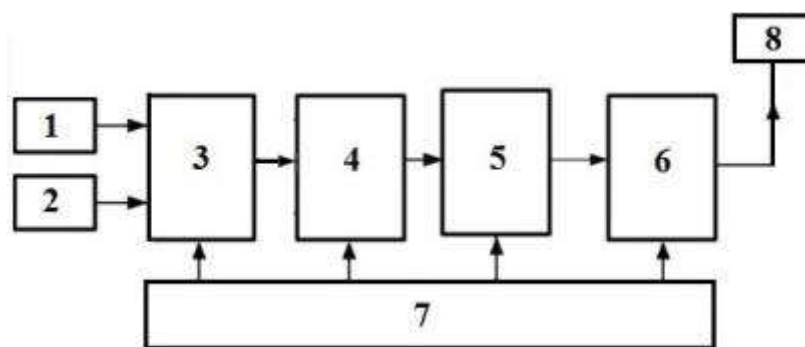


Рис. 2. Структурная схема передающего устройства диагностики электропневматических тормозов пассажирского вагона:

1 – датчик тока; 2 – датчик напряжения; 3 – аналого-цифровой преобразователь; 4 – микроконтроллер; 5 – шифратор; 6 – передающее устройство; 7 – блок питания; 8 – канал передачи данных

Fig. 2. Structural diagram of the transmitting device for diagnostics of electro-pneumatic brake of a passenger wagon:

1 – current sensor; 2 – voltage sensor; 3 – analog-to-digital converter; 4 – micro-controller; 5 – encoder; 6 – transmitting device; 7 – power supply; 8 – data transmission channel

да разработано электронное устройство. Принцип его работы основан на диагностике состояния электрической цепи и режимов работы тормозного оборудования. Устройство диагностики состоит из двух полукомплектов. Передающий полукомплект, структурная схема которого приведена на рис. 2, устанавливается в каждом вагоне.

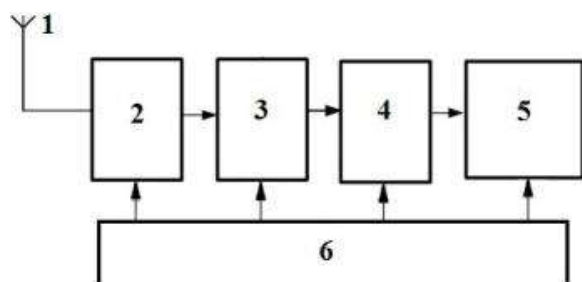


Рис. 3. Структурная схема приемного полукомплекта устройства диагностики электропневматических тормозов пассажирского вагона:

1 – канал передачи данных; 2 – приемное устройство; 3 – дешифратор; 4 – исполнительное устройство; 5 – панель индикации; 6 – источник питания

Fig. 3. Structural diagram of the receiving half-set devices for diagnosing the electro-pneumatic brake of a passenger wagon:

1 – data transmission channel; 2 – receiving device; 3 – decoder; 4 – executive device; 5 – indication panel; 6 – power supply

Каждый передающий полукомплект устройства диагностики содержит датчик тока и датчик напряжения, аналоговые сигналы с которых с помощью аналого-цифровых преобразователей преобразуются в цифровые сигналы, а затем поступают на вычислительный микропроцессорный блок. Обработка поступающей информации с датчиков осуществляется микропроцессорным блоком.

При возникновении неисправности в электропневматической системе тормозов пассажирского поезда электронное устройство формирует сигнал, который поступает на передающее устройство и потом по каналам связи передается на приемное устройство, расположенное в кабине машиниста локомотива [15, 16].

Через оптический порт устройство подключается к ноутбуку, и оператор задает номер вагона, в котором это устройство будет установлено в вагон. Через этот порт можно запрограммировать микроконтроллер при совершенствовании программного обеспечения данного устрой-

ства диагностики.

Приемный полукомплект, структурная схема которого приведена на рис. 3, устанавливается в кабине машиниста локомотива [17, 18].

При поступлении сигнала с устройства, установленного в вагоне, в котором возникла неисправность тормозной системы ЭПТ, на передней панели приемного полукомплекта (рис. 4) светится светодиод, по которому машинист может определить номер вагона, где возникла неисправность [19].



Рис. 4. Расположение многоцветных RGB светодиодов на передней панели приемного полукомплекта устройства диагностики электропневматических тормозов в соответствии с номером вагона в поезде

Fig. 4. Location of multi-color RGB LEDs on the front panel the receiving half-set of the electro-pneumatic brake diagnostic device in accordance with the number of the wagon in the train

Расположение приемного полукомплекта устройства диагностики ЭПТ на пульте машиниста показано на рис. 5.

В настоящее время развитие вагоностроения в Российской Федерации идет по пути внедрения цифровых технологий. Такая же тенденция прослеживается и в тормозостроении для грузовых и пассажирских поездов. Примерами таких технологий можно назвать различные системы типа БТО111, БТО111Н для

длиннобазных вагонов-платформ для перевозки 80-ти футовых контейнеров, системы распределенного управления тормозами в длиннооставных грузовых поездах РУТП 230, РУТП 130, РУТП 395.

Для пассажирских поездов, обращающихся со скоростями до 200 км/ч, моторвагонного подвижного состава и скоростных контейнерных поездов в качестве примера систем цифровизации можно привести цифровую систему управления и диагностики тормозов ИСКРА 200, которая представляет собой интеллектуальную систему координации работы автоматических тормозов.

Данная система позволяет в реальном времени диагностировать состояние тормозной системы в движении и на стоянке, осуществлять автоматический контроль переходных сопротивлений в соединительных рукавах, вести контроль нагрева буксовых узлов, контролировать динамику поезда, образование ледяных пробок, следить за работой воздухораспределителей. Также работниками АО МТЗ Трансмаш разработана новая система управления тормозами для локомотивов (ТОЛ) [19].

Данная система обладает компактным дизайном, улучшенными схемными решениями,

новой элементной базой, высокой надежностью, улучшенными ремонтпригодностью и эксплуатационными свойствами. Однако, несмотря на широкий спектр новейшего оборудования в области тормозных систем, оно позволяет лишь определить обрыв в электрической цепи ЭПТ, но не способно указать конкретное место возникновения неисправности.

Таким образом, разработанное электронное устройство для определения номера конкретного вагона, где произошел отказ ЭПТ, и вида этого отказа могло бы расширить функционал существующих цифровых систем диагностики, что положительно отразится на качестве работы тормозных средств пассажирского подвижного состава и позволит повысить пропускную и провозную способности железных дорог, а также улучшить показатели безопасности движения.

Заключение

Разработанное электронное устройство позволяет по информации, отображаемой на лицевой панели прибора, расположенного в кабине машиниста локомотива, определить номер вагона и предварительно оценить вид неисправности в системе электропневматического



Рис. 5. Расположение приемного полукомплекта устройства диагностики электропневматических тормозов:

1 – устройство диагностики электропневматических тормозов; 2 – светодиоды панели индикации

Fig. 5. Location of the receiving half-set of the electropneumatic brake diagnostic device:

1 – electropneumatic brake diagnostic device; 2 – display panel LEDs

тормоза при движении пассажирского поезда, простой вагонов, а также повысит эффективность эксплуатации подвижного состава. что сократит время, затрачиваемое на поиск места возникновения неисправности, уменьшит

Список литературы

1. Афонин Г.С., Барщенков В.Н., Кондратьев Н.В. Устройство и эксплуатация тормозного оборудования подвижного состава. М. : Академия, 2006. 304 с.
2. Анализ проблемы отказов при эксплуатации пассажирских вагонов / А.В. Зяблов, А.И. Быков, А.А. Петров и др. // Наука и техника транспорта. 2020. № 4. С. 30–33.
3. Надежность и функциональная безопасность как основные составляющие качества пассажирских вагонов / С.В. Петров, Г.В. Райков, Ю.В. Корнев и др. // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 4. С. 241–249.
4. Крылов В.И., Астахов П.Н., Гребенюк П.Т. Справочник по тормозам. М. : Транспорт, 1975. 185 с.
5. Иноземцев В.Г. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М. : Транспорт, 1985. 122 с.
6. Венцевич Л.Е. Тормоза подвижного состава железных дорог. М. : УМЦ ЖДТ, 2010. 559 с.
7. Галай Э.И., Рудов П.К., Галай Е.С. Тормозная сила композиционных тормозных колодок по мере их износа на грузовых вагонах // Проблемы безопасности на транспорте : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. Гомель, 2020. С. 39–41.
8. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : утв. 6–7.05.2014 Советом по ж.-д. транспорту государств-участников Содружества. М., 2014. 268 с.
9. Асадченко В.Р. Автоматические тормоза подвижного состава. М. : Маршрут, 2006. 392 с.
10. Крылов В.И. Тормозное оборудование железнодорожного подвижного состава. М. : Транспорт, 1989. 487 с.
11. Абашкин И.В. Инструкция по эксплуатации тормозов подвижного состава железных дорог. М. : Трансинфо, 2005. 160 с.
12. Бурченков В.В. Автоматизация контроля технического состояния подвижного состава. Гомель : БелГУТ, 2008. 235 с.
13. Сергеев Б.Б. Автоматические тормоза. Ч. 1. Омск : ОмГУПС, 2007. 31 с.
14. Галай Э.И., Рудов П.К., Галай Е.Э. Тормозные системы железнодорожного транспорта. Расчет автоматических тормозов. Гомель : БелГУТ. 2014. 271 с.
15. Гундорова Е.П. Технические средства железных дорог. М. : Маршрут, 2003. 496 с.
16. Интеллектуальная система тормозной сети поезда / А.М. Худогонов, П.Ю. Иванов, Н.И. Мануилов и др. // Известия ПГУПС. 2018. № 1. С. 130–135.
17. Баранов В.Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы (+CD). М. : Додэка-XXI, 2006. 288 с.
18. Мышляева И.М. Цифровая схемотехника. М. : Академия, 2005. 400 с.
19. ТОЛ- Новая система управления тормозами для локомотивов / С.Г. Чуев, П.М. Тагиев, С.А. Популковский и др. // Локомотив. 2022. № 1. С. 32–36.

References

1. Afonin G.S., Barshenkov V.N., Kondrat'ev N.V. Ustroistvo i ekspluatatsiya tormoznogo oborudovaniya podvizhnogo sostava [Installation and operation of rolling stock braking equipment]. Moscow: Akademiya Publ., 2006. 304 p.
2. Zyablov A.V., Bykov A.I., Petrov A.A., Bepal'ko S.V. Analiz problemy otkazov pri ekspluatatsii passazhirskikh vagonov [Analysis of the problem of failures in the operation of passenger wagons]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport], 2020, no. 4, pp. 30–33.
3. Petrov S.V., Raikov G.V., Kornev Yu.V., Karavanova N.B. Nadezhnost' i funktsional'naya bezopasnost' kak osnovnyye sostavlyayushchie kachestva passazhirskikh vagonov [Reliability and functional safety as the main components of the quality of passenger wagons]. *Vestnik VNIIZHT* [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport], 2018, vol. 77, no. 4, pp. 241–249.
4. Krylov V.I., Astakhov P.N., Grebenyuk P.T. Spravochnik po tormozam [Brake Reference]. Moscow: Transport Publ., 1975. 185 p.
5. Inozemtsev V.G. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty [Rules of traction calculations for train work]. Moscow: Transport Publ., 1985. 122 p.
6. Ventsevich L.E. Tormoza podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Railway Train brakes]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2010. 559 p.
7. Galai E.I., Rudov P.K., Galai E.S. Tormoznaya sila kompozitsionnykh tormoznykh kolodok po mere ikh iznosa na gruzovykh vagonakh [Braking force of composite brake pads as they wear out on freight wagons]. *Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy bezopasnosti na transporte»* [Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference «Problems of safety in transport»]. Gomel, 2020, pp. 39–41.
8. Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava : utverzhdeny 6–7.05.2014 Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv – uchastnikov Sodruzhestva [Rules for the maintenance of the brake equipment and the brake control of railway rolling stock: approved May 6–7, 2014 by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States]. Moscow, 2014. 268 p.
9. Asadchenko V.R. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava [Automatic train brakes]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 392 p.
10. Krylov V.I. Tormoznoe oborudovanie zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. [Railway train braking equipment]. Moscow: Transport Publ., 1989. 487 p.

11. Abashkin I.V. Instruksiya po ekspluatatsii tormozov podvizhnogo sostava zheleznykh dorog. [Operating instructions for train brakes]. Moscow: Transinfo Publ., 2005. 160 p.
12. Burchenkov V.V. Avtomatizatsiya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya podvizhnogo sostava [Automation of control of the technical condition of train]. Gomel': BelGUT Publ., 2008. 235 p.
13. Sergeev B.B. Avtomaticheskie tormoza. Chast' 1. [Automatic brakes. Part 1]. Omsk: OmGUPS Publ., 2007. 31 p.
14. Galai E.I., Rudov P.K., Galai E.E. Tormoznye sistemy zheleznodorozhnogo transporta. Raschet avtomaticheskikh tormozov [Brake systems of railway transport. Calculation of automatic brakes]. Gomel': BelGUT Publ., 2014. 271 p.
15. Gundorova E.P. Tekhnicheskie sredstva zheleznykh dorog [Technical means of railways]. Moscow: Marshrut Publ., 2003. 496 p.
16. Khudonogov A.M., Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Dulskii E.Yu. Intellektual'naya sistema tormoznoj seti poezda [Intellectual system of train braking network]. *Izvestiya PGUPS* [Bulletins of the Petersburg State Transport University], 2018, no. 1, pp. 130–135.
17. Baranov V.N. Primenenie mikrokontrollerov AVR: skhemy, algoritmy, programmy (+CD) [Application of microcontrollers AVR: schemes, algorithms, programs (+ CD)]. Moscow: Dodeka-XXI Publ., 2006. 288 p.
18. Myshlyayeva I.M. Tsifrovaya skhemotekhnika [Digital circuitry]. M.: Akademiya Publ., 2005. 400 p.
19. Chuev S.G., Tagiev P.M., Populovskii S.A., Utenkov S.A. TOL – Novaya sistema upravleniya tormozami dlya lokomotivov [TOL – is a new brake control system for locomotives]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2022, no. 1, pp. 32–36.

Информация об авторах

Родченко Александр Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Омский государственный университет путей сообщения, Омск; e-mail: Rodchenko_57@mail.ru.

Томилова Ольга Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Омский государственный университет путей сообщения, Омск; e-mail: motovilova@yandex.ru.

Сергеев Павел Борисович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Омский государственный университет путей сообщения, Омск; e-mail: Sergeevpb78@mail.ru.

Михеев Владислав Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Омский государственный университет путей сообщения, Омск; e-mail: Micheev_v_a@mail.ru.

Information about the authors

Alexander D. Rodchenko, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: Rodchenko_57@mail.ru.

Olga S. Tomilova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: motovilova@yandex.ru.

Pavel B. Sergeev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: Sergeevpb78@mail.ru.

Vladislav A. Mikheev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: Micheev_v_a@mail.ru.

Прогноз-модель оценки ресурса объекта диагноза с учетом изменения стоимости пропуска дефекта

С.В. Барсуков✉, С.В. Пахомов

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

✉bars_irkutsk@mail.ru

Резюме

Важнейшей составной частью технической эксплуатации оборудования является диагностика его технического состояния. Качественная и своевременная диагностика объекта диагноза является важным средством повышения эффективности его эксплуатации. Сущность оценки технического состояния объекта диагноза заключается в сборе и анализе его эксплуатационных параметров, а также в периодическом анализе тенденции и скорости изменения параметров с нарабаткой, обусловленной ухудшением технического состояния изделия. Об изменении технического состояния объекта судят по значениям диагностических (контролируемых) параметров, позволяющих определить техническое состояние объекта без его разборки. Чем больше диагностических параметров используется при диагностике объекта и чем чаще производится диагностика, тем точнее и достовернее диагноз. И наоборот, чем меньше диагностических параметров используется и чем реже проводятся замеры при диагностике, тем экономически дешевле и менее эффективно осуществляется эксплуатация оборудования. Это заставляет выбирать оптимальное количество диагностируемых параметров и периодичность их измерения. При оценке технического состояния объекта диагноза присутствует неопределенность принятия решения в постановке диагноза. В процессе диагностики технических объектов широко применяются статистические методы, или методы статистических решений. Решающее правило выбирается исходя из некоторых условий оптимальности, например, из условия минимального риска принятия ошибочного решения при диагнозе. В работе в качестве инструмента исследования выбран метод Неймана – Пирсона. Рассматривается технология распознавания состояния объекта диагноза при наличии одного диагностического параметра. Отмечена роль оценки стоимости ошибок диагноза при разработке периодичности контрольных проверок оборудования и в количестве измеряемых диагностических признаков. Таким образом, в предлагаемой работе показана разработка методики отбора необходимых и достаточных диагностических признаков на основе метода Неймана – Пирсона для достоверного диагностирования технического состояния силового трансформатора с учетом изменения стоимости пропуска дефекта.

Ключевые слова

прогноз-модель, диагностический параметр, техническое состояние объекта, диагностика объекта, стоимость пропуска дефекта, метод Неймана – Пирсона

Для цитирования

Барсуков С.В. Прогноз-модель оценки ресурса объекта диагноза с учетом изменения стоимости пропуска дефекта / С.В. Барсуков, С.В. Пахомов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 144–152. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).144-152.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 26.12.2022 г.; принята к публикации: 27.12.2022 г.

Forecast model for evaluating the resource of the diagnosed object taking into account changes in the cost of missing a defect

S.V. Barsukov✉, S.V. Pakhomov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉bars_irkutsk@mail.ru

Abstract

The most important component of the technical operation of the equipment is the diagnosis of its technical condition. High-quality and timely technical diagnostics of an object is an important means of increasing the efficiency of its operation. The essence of the assessment of the technical condition of the diagnosed object is to collect and analyze the operational parameters of the object in question, as well as periodic analysis of the trend and rate of change of parameters with operating time due to the deterioration of the product's technical condition. A change in the technical condition of an object is judged by the values of diagnostic (controlled) parameters allowing to determine the technical condition of the object without disassembling it, in the process of their control. The more diagnostic parameters are used in the diagnosis of the object and the more often the diagnosis is made, the more accurate and reliable the diagnosis is. But the fewer diagnostic parameters are used, the less measurements are taken during diagnostics, the cheaper and more efficient the operation of the equipment is. This makes it necessary to choose the

optimal number of diagnostic parameters and the frequency of their measurement. When assessing the technical condition of the object of diagnosis, there is uncertainty of decision-making in the diagnosis. Statistical methods, the so-called methods of statistical solutions, are widely used in the diagnosis of technical objects. In this case, the decisive rule is chosen based on certain optimality conditions, for example, from the condition of minimal risk of making an erroneous decision during diagnosis. In this paper, the Neumann–Pearson method was chosen as a research tool. The technology of identifying the state of the object of diagnosis in the presence of one diagnostic parameter is considered. The role of estimating the cost of diagnostic errors in the development of the frequency of control checks of equipment and in the number of measured diagnostic signs is shown. Thus, the proposed work shows the development of a methodology for selecting necessary and sufficient diagnostic features based on the Neumann–Pearson method for reliable diagnosis of the technical condition of a power transformer, taking into account changes in the cost of passing a defect.

Keywords

forecast-model, diagnostic parameter, technical condition of the object, diagnostics of the object, the cost of missing the defect, the Neumann–Pearson’s method

For citation

Barsukov S.V., Pakhomov S.V. Prognoz-model’ otsenki resursa ob’ekta diagnoza s uchetom izmeneniya stoimosti propuska defekta [Forecast model for evaluating the resource of the diagnosed object taking into account changes in the cost of missing a defect]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 144–152. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).144-152.

Article info

Received: October 20, 2022; Revised: December 26, 2022; Accepted: December 27, 2022.

Введение

Известны основные классические подходы, используемые при организации ремонтно-профилактических мероприятий на больших парках однотипного оборудования [1–5]:

1. Система планово-предупредительного ремонта (эксплуатация «по назначенному ресурсу»).

2. Принцип технической эксплуатации (ТЭ) блоков, агрегатов и элементов конструкций «по техническому состоянию».

В настоящее время широко внедряется стратегия технического обслуживания и ремонта (ТОиР) оборудования «по техническому состоянию». Основная цель перехода на стратегию ТОиР «по техническому состоянию» является:

– повышение безотказности;

– снижение затрат на ТЭ.

Указанные подходы отличаются тем, что при их использовании по-разному назначается периодичность и объемы работ при обслуживании объекта диагноза (ОД).

При развитии стратегии ТОиР «по техническому состоянию» необходимо наличие достаточных диагностических признаков для выявления текущего технического состояния ОД. Нужно также иметь информацию об уровне риска ошибок при постановке диагноза оборудования.

Данная работа посвящена разработке методики оценки количества диагностических признаков для постановки верного диагноза о текущем техническом состоянии оборудования с учетом стоимости пропуска дефекта.

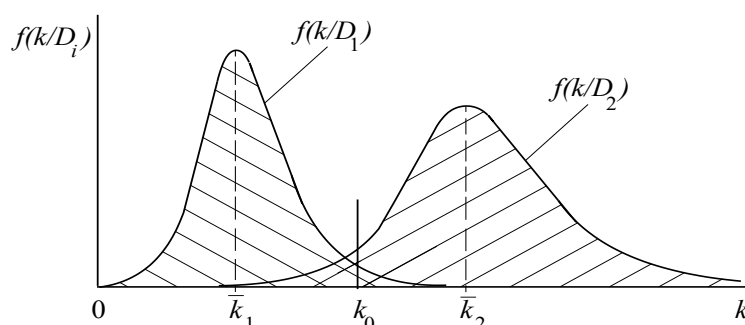


Рис. 1. Плотность вероятности диагностического признака k для двух состояний объекта диагноза (\bar{k}_1 и \bar{k}_2 – средние значения (математические ожидания) диагностического признака k)

Fig. 1. Probability density of diagnostic feature k for two states of the object of diagnosis (\bar{k}_1 and \bar{k}_2 – average values (mathematical expectations) of the diagnostic feature k)

Имеются статистические методы распознавания признаков, которые позволяют определить границу принятия решения о техническом состоянии ОД, а также количественно оценить возможные ошибки при постановке диагноза [6–12]. Вероятность принятия ошибочного решения о диагнозе оценивается средним риском. При этом определяется плотность вероятности некоторого диагностического параметра k для выявления исправного (D_1) и неисправного (D_2) состояния ОД. Обозначим k как выходной эксплуатационный параметр ОД, а k_0 – граничное значение выходного эксплуатационного параметра. Параметр k_0 позволяет судить о степени исправности оборудования:

- при $k < k_0$, $k \in D_1$ – ОД исправен;
- при $k > k_0$, $k \in D_2$ – ОД неисправен (присутствует дефект).

На рис. 1 приведены значения плотности вероятности диагностического параметра k для двух состояний ОД.

В реальных системах обычно встречаются ситуации, когда плотности вероятности $f(k/D_1)$ и $f(k/D_2)$ имеют общую область. При этом выбор граничной величины k_0 связан с определенным риском постановки неверного диагноза о текущем техническом состоянии ОД.

Возможными ошибками постановки диагноза ОД являются ложная тревога (ошибка первого рода) и вероятность пропуска дефекта (ошибка второго рода).

В первом случае исправный ОД признается дефектным: ОД исправен (реальное состояние ОД – D_1), но параметр k превышает его предельное значение ($k > k_0$). Во втором случае ОД, имеющий дефект, признается исправным (реальное состояние ОД – D_2), но параметр k не превышает его предельное значение ($k < k_0$).

Ошибочное решение при постановке диагноза ОД складывается из вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска дефекта.

Если добавить экономическую оценку ущерба от этих ошибок, то получим обобщающий показатель оценки ошибочных решений – величина среднего риска (ожидаемая величина потерь, в том числе экономических). Количественно вероятность ошибочного решения (средний риск) определяется как сумма вероятных событий:

$R = C_{11} \cdot P(H_{11}) + C_{21} \cdot P(H_{21}) + C_{12} \cdot P(H_{12}) + C_{22} \cdot P(H_{22})$, (1)
где C_{11} , C_{22} – экономические оценки стоимости правильных решений при постановке диагноза

(отсутствие ложной тревоги и пропуска дефекта соответственно); C_{21} , C_{12} – экономическая оценка стоимости ложной тревоги и пропуска дефекта соответственно; $P(H_{11})$, $P(H_{22})$ – вероятности правильных решений при постановке диагноза (вероятности отсутствия ложной тревоги и пропуска дефекта соответственно):

– вероятность ложной тревоги –

$$P(H_{21}) = P(D_1) \cdot P(k > k_0 / D_1) = P_1 \cdot \int_{k_0}^{\infty} f(k / D_1) \cdot dk ;$$

– вероятность пропуска дефекта –

$$P(H_{12}) = P(D_2) \cdot P(k < k_0 / D_2) = P_2 \cdot \int_{-\infty}^{k_0} f(k / D_2) \cdot dk .$$

В качестве инструмента минимизации вероятности пропуска дефекта при заданном допустимом уровне вероятности ложной тревоги использован метод Неймана – Пирсона.

В качестве объекта диагноза выбран силовой трансформатор с жидким диэлектриком. На этом ОД апробирована методика отбора необходимого и достаточного количества диагностических признаков на основе метода Неймана–Пирсона с учетом стоимости пропуска дефекта.

Согласно назначенному регламенту, диагностика состояния трансформатора проводится через каждые пять лет эксплуатации. Оценка его состояния осуществляется по количеству примесей железа в диэлектрической жидкости (в масле) трансформатора (параметр k): если $k < k_0$, то $k \in D_1$ (трансформатор признается исправным); если $k > k_0$, то $k \in D_2$ (трансформатор признается неисправным).

Для реализации стратегии обслуживания трансформатора «по техническому состоянию» предлагается замерять содержание железа в масле бака не через каждые пять лет эксплуатации, а каждый год. Более частая диагностика трансформатора становится экономически приемлемой в условиях развития методов и технологий контроля параметров работы трансформатора технологически более простыми методами и с меньшими затратами.

На рис. 2 показаны результаты расчета значений плотности вероятности диагностического параметра k , а также распределения граничного значения параметра k_0 по годам эксплуатации при исправном D_1 и неисправном D_2 состояниях трансформатора при принятом соотношении стоимостей $C_{12} / C_{21} = 20$. Также показано распределение граничного параметра k_0 по

годам эксплуатации трансформатора ($k_1 - k_5$).

На рис. 3 показаны расчетные изменения вероятности ложной тревоги, вероятности пропуска дефекта и среднего риска по годам эксплуатации трансформатора при этих же условиях.

Анализ зависимости среднего риска по годам эксплуатации показывает: для того, чтобы реализовать стратегию технического обслуживания и профилактического ремонта оборудования «по техническому состоянию» нет необходимости использовать большое количе-

ство диагностических признаков для постановки диагноза о реальном техническом состоянии оборудования. Вероятность ошибки типа «пропуск дефекта» с ростом наработки ОД уменьшается. Оценка предельного уровня риска R_{\max}^{don} принятия ошибочного решения о техническом состоянии трансформатора позволяет выделить научно-обоснованный этап эксплуатации объекта диагноза (после второго года эксплуатации), когда количество измеряемых диагностических признаков для оценки реального техни-

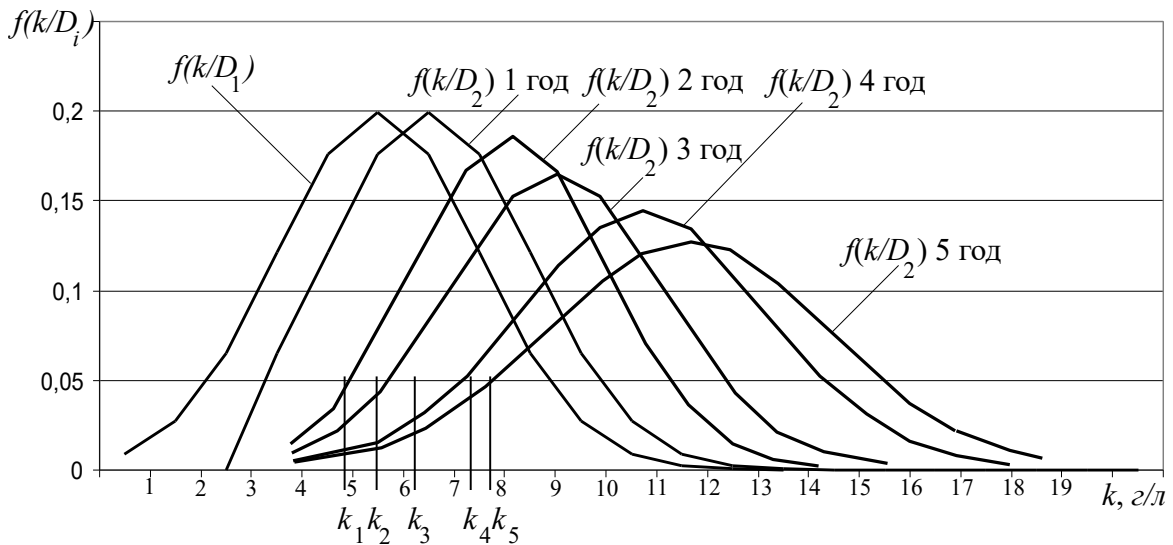


Рис. 2. Изменение плотности вероятности диагностического параметра k по годам эксплуатации трансформатора при принятом соотношении $C_{12} / C_{21} = 20$

Fig. 2. Change in the probability density of the diagnostic parameter k over the years of operation of the transformer with the accepted ratio $C_{12} / C_{21} = 20$

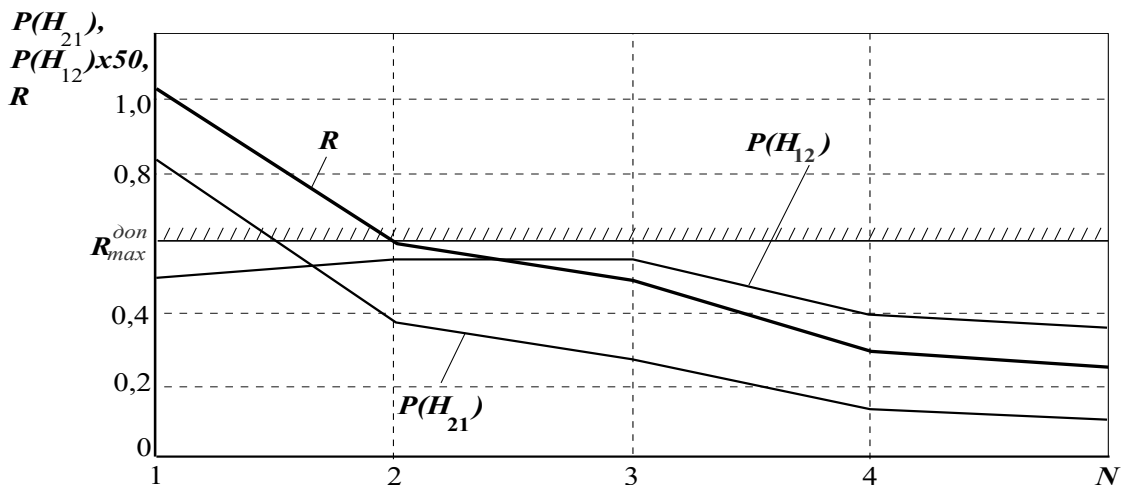


Рис. 3. Изменение вероятности ложной тревоги $P(H_{21})$, вероятности пропуска дефекта $P(H_{12})$ и среднего риска R по годам эксплуатации (N) силового трансформатора при принятом соотношении $C_{12} / C_{21} = 20$

Fig. 3. Change in the probability of a false alarm $P(H_{21})$, the probability of missing a defect $P(H_{12})$ and the average risk R over the years of operation (N) of the power transformer with the accepted ratio $C_{12} / C_{21} = 20$

ческого состояния оборудования можно сократить до минимума. Это позволяет в целом снизить затраты на диагностику ОД [13–15].

Рассмотренный подход к постановке диагноза одним из методов статистических решений позволяет учитывать экономическую составляющую в принятии решения об исправности или неисправности ОД.

На рис. 4 показано изменение плотности вероятности диагностического параметра k при исправном D_1 и неисправном D_2 состояниях трансформатора по годам эксплуатации с учетом зависимости от стоимости пропуска дефекта C_{12} . Граничное значение количества примесей железа в жидкой изоляции трансформатора (k_0) по годам эксплуатации и при фиксированной стоимости пропуска дефекта C_{12} смещается слева направо. Но при прочих равных условиях по мере увеличения стоимости пропуска дефекта C_{12} диапазон изменения граничного значения k_0 смещается влево по графику.

Например, при максимальном выбранном соотношении $C_{12} / C_{21} = 20$ диапазон изменения граничного значения k_0 смещен максимально влево по графику рис. 4. При этом уменьшается зона «перекрывания» функций распределения $f(k/D_1)$ и $f(k/D_2)$.

В этой области графика высока вероят-

ность исправного состояния трансформатора (состояние D_1). Вероятность неисправного состояния трансформатора (состояние D_2) – мала. Это соотношение в целом повышает вероятность ошибочного диагноза «ложная тревога» и уменьшает вероятность ошибочного диагноза «пропуск дефекта».

Ошибка диагноза – «ложная тревога» – наносит экономический ущерб. Это выражается в том, что оборудование в плановом порядке досрочно снимается с эксплуатации (досрочно проводятся капитальные и другие виды ремонтов и профилактических мероприятий). Оборудование не вырабатывает полностью свой ресурс до капитального ремонта (или полного обновления). Ремонтно-профилактические мероприятия на ОД проводятся чаще, чем это экономически целесообразно. При повышении стоимости оборудования повышается величина ущерба, наносимого ошибочным диагнозом «ложная тревога».

Ошибка диагноза – «пропуск дефекта» – наносит экономический ущерб потому, что оборудование, считающееся исправным, с высокой вероятностью отказывается неожиданно. Часто это сопровождается катастрофическими последствиями (разрушения, пожары, взрывы). Ремонтно-профилактические мероприятия, замена

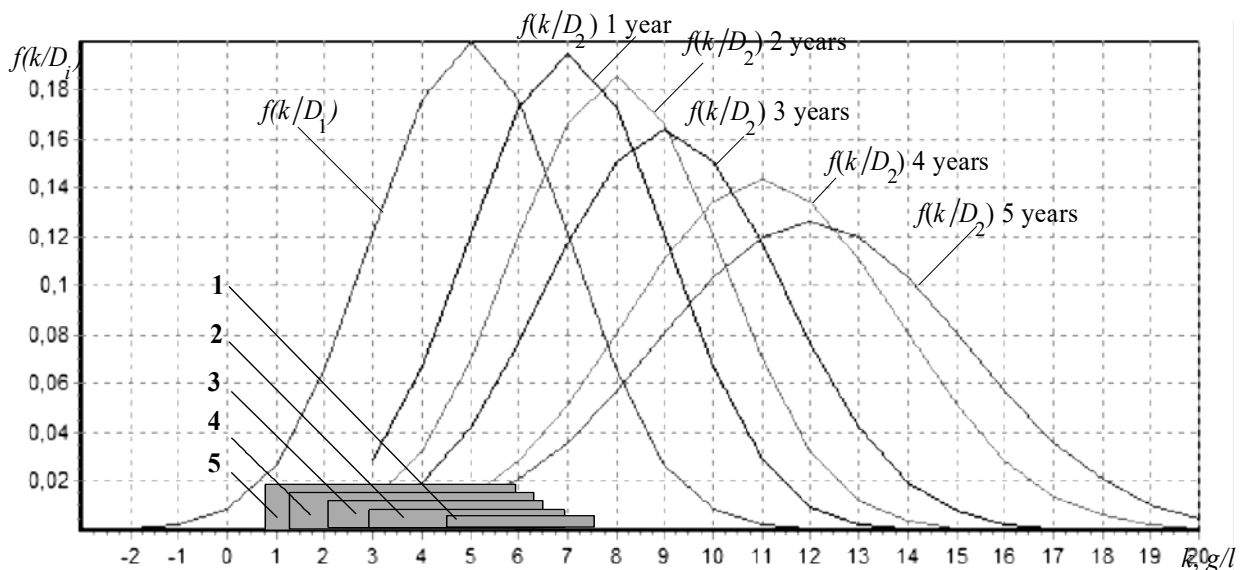


Рис. 4. Изменение плотности вероятности диагностического параметра k при исправном D_1 и неисправном D_2 состояниях трансформатора по годам эксплуатации с учетом стоимости пропуска дефекта C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

Fig. 4. Change in the probability density of the diagnostic parameter k with a serviceable D_1 and faulty D_2 transformer states by years of operation, taking into account the cost of skipping the defect C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

отказавшего оборудования проводятся в авральном порядке, без всякого планирования. Не считаясь с экономическими затратами, в кратчайшие сроки формируют ремонтные бригады, аккумулируют ресурсы для ремонта, доставляют заменяемые узлы и агрегаты.

Все мероприятия направлены на уменьшение времени простоя оборудования и на устранение возможных последствий его отказа. При повышении стоимости оборудования повышается величина ущерба, наносимого ошибочным диагнозом «пропуск дефекта». Стоимость ущерба от пропуска дефекта гораздо выше, чем от ложной тревоги [16–19].

На рис. 5 показано изменение вероятности ложной тревоги по годам эксплуатации в зависимости от стоимости пропуска дефекта C_{12} . Расчеты показывают, что при низкой стоимости оборудования и экономических послед-

ствий его отказа вероятность ошибки диагноза «ложная тревога» снижается по годам эксплуатации в 4,5 раза.

По мере увеличения экономической оценки стоимости пропуска дефекта до соотношения $C_{12} / C_{21} = 100$ вероятность ложной тревоги по годам эксплуатации уменьшается менее интенсивно (в 1,4 раза).

Математически влияние стоимости пропуска дефекта (C_{12}) сказывается через отношение правдоподобия при вычислении граничного значения количества примесей железа в жидкой изоляции трансформатора (k_0). С психологической точки зрения эта тенденция также подтверждается.

При повышенной стоимости диагностируемого оборудования (и последствий его спонтанного отказа) специалисты-диагносты при постановке диагноза с большей вероятностью го-



Рис. 5. Изменение вероятности ложной тревоги по годам эксплуатации в зависимости от стоимости пропуска дефекта C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

Fig. 5. Change in the probability of a false alarm over the years of operation, depending on the cost of skipping the defect C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

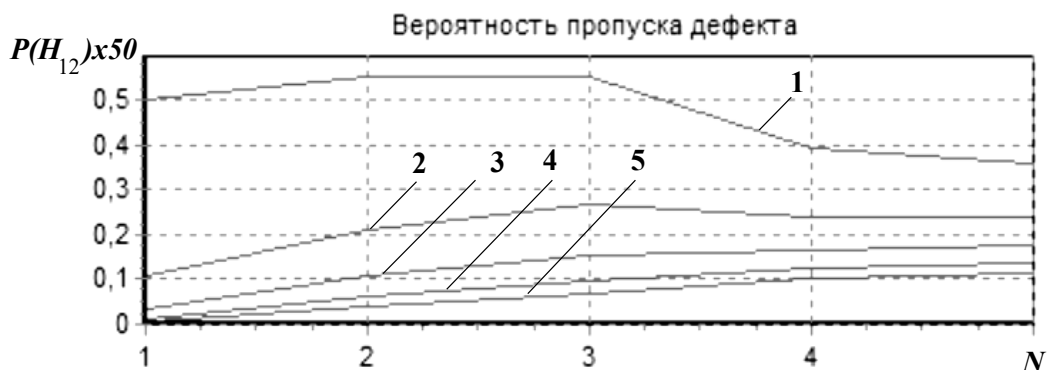


Рис. 6. Изменение вероятности пропуска дефекта по годам эксплуатации в зависимости от стоимости пропуска дефекта C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

Fig. 6. Change in the probability of missing a defect over the years of operation, depending on the cost of missing a defect C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

товы ошибаться в сторону «ложной тревоги», нежели в сторону «пропуска дефекта».

На рис. 6 показано изменение вероятности пропуска дефекта по годам эксплуатации в зависимости от стоимости пропуска дефекта C_{12} .

При низкой стоимости оборудования и экономических последствий его отказа вероятность ошибки диагноза «пропуск дефекта» в целом высока и находится в диапазоне 0,35–0,5.

По мере увеличения экономической оценки стоимости пропуска дефекта до соотношения $C_{12} / C_{21} = 100$ вероятность пропуска дефекта в целом уменьшается и находится в диапазоне значений 0,01–0,25. Математически влияние стоимости пропуска дефекта (C_{12}) сказывается через отношение правдоподобия при вычислении граничного значения количества примесей железа в жидкой изоляции трансформатора (k_0). С психологической точки зрения эта тенденция также подтверждается. При повышенной стоимости диагностируемого оборудования (и последствий его спонтанного отказа) специалисты-диагносты при постановке диагноза с небольшой вероятностью готовы ошибаться в сторону «пропуска дефекта». На рис. 7 показано изменение среднего риска по годам эксплуатации в зависимости от стоимости пропуска дефекта C_{12} . Анализ графиков показывает, что при повышении стоимости оборудования и увеличении стоимости пропуска дефекта величина среднего риска по годам эксплуатации ОД изменяется.

Если при минимальном соотношении стоимостей C_{12} / C_{21} ($C_{12} / C_{21} = 20$) средний риск за пять лет эксплуатации уменьшается в 2,5 раза, то при максимальном соотношении C_{12} / C_{21}

($C_{12} / C_{21} = 100$) средний риск за пять лет эксплуатации увеличивается в 1,2 раза. Следовательно, если при минимальном соотношении стоимостей количество измеряемых диагностических признаков для оценки реального технического состояния оборудования можно сократить до минимума, то при соотношении $C_{12} / C_{21} = 100$ количество измеряемых диагностических признаков для оценки реального технического состояния оборудования нельзя сокращать в течение всего периода эксплуатации, а даже наоборот, после третьего года эксплуатации трансформатора необходимо уделять повышенное внимание текущему состоянию оборудования. Возможно, это потребует увеличения количества измеряемых диагностических признаков для оценки реального технического состояния ОД. Это необходимо учитывать при планировании затрат на эксплуатацию рассматриваемого ОД.

Заключение

В результате выполненных исследований выявлено: для того чтобы реализовать стратегию технического обслуживания и профилактического ремонта оборудования «по техническому состоянию», необходимо учитывать стоимость оборудования и стоимость ошибочных решений при диагностике ОД. Типовыми ошибками диагноза ОД являются ложная тревога (оценивается стоимостью последствий C_{21}) и пропуск дефекта (оценивается стоимостью последствий C_{12}).

В работе в качестве объекта диагноза выбран силовой трансформатор с жидким диэлектриком. На этом ОД апробирована методика



Рис. 7. Изменение вероятности среднего риска по годам эксплуатации с учетом стоимости пропуска дефекта C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

Fig. 7. Change in the probability of the average risk over the years of operation, taking into account the cost of missing the defect C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

отбора необходимого и достаточного количества диагностических признаков на основе метода Неймана – Пирсона с учетом стоимости пропуска дефекта.

Представленная работа позволит преодолеть сложности при внедрении стратегии ТОиР «по техническому состоянию», заключающиеся в необходимости наличия достаточного количества информативных диагностических признаков для оценки реального технического состояния ОД. Проведенные исследования позволяют

научно обосновать отбор количества параметров, исследуемых для оценки текущего технического состояния ОД. Доказано, что количество таких параметров может изменяться в зависимости периода эксплуатации ОД.

Результаты работы могут быть использованы при разработке методики отбора диагностических признаков для постановки верного диагноза о текущем техническом состоянии оборудования с учетом стоимости пропуска дефекта.

Список литературы

1. Правила организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей СО 34.04.181-2003. М., 2004. 447 с.
2. Стенин В.А., Беркович Я.Д. К вопросу увеличения межремонтного периода энергооборудования // Электрические станции. 1988. № 7. С. 58–60.
3. Пути совершенствования системы ремонта энергетических установок / А.В. Андрюшин, В.А. Стенин, Н.И. Тимошенко и др. // Вестник МЭИ. 1997. №3. С. 27–31.
4. Назарычев А.Н. Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния. Иваново : ИГЭУ, 2002. 168 с.
5. Фудзияма К., Сайто К. Метод прогнозирования оптимальных интервалов ремонта и объемов ремонта корпусов паровых турбин на основе статистического анализа данных о длине трещины // Журнал Общества материаловедения. 2014. № 63 (8). С. 608–613.
6. Малкин В.С. Техническая диагностика. М. : Лань, 2013. 272 с.
7. Сафарбаков А.М., Лукьянов А.В., Пахомов С.В. Основы технической диагностики деталей и оборудования. Ч. 1. Иркутск : ИрГУПС, 2007. 128 с.
8. Любимов И.В., Мешков С.А. Статистические методы контроля качества и надежности технических систем. СПб. : Балт. гос. техн. ун-т., 2010. 93 с.
9. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Диагностика и техническое обслуживание электроустановок потребителей. М. : НЦ ЭНАС, 2016. 392 с.
10. Барсуков С.В., Пахомов С.В., Логинова Н.С. Модель технического обслуживания объекта системы железнодорожного транспорта «по техническому состоянию» на основании диагностирования методом минимального риска // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : тр. науч.-практ. конф. Иркутск, 2017. Т. 2. С. 609–612.
11. Barsukov S., Pakhomov S. Forecast model for estimating the service life of a diagnosed object based on the Neyman-Pearson method // 10th International Scientific and Technical Conference «Polytransport Systems». Tomsk, 2018 Vol. 216. P. 03011.
12. Клячкин В.Н. Статистические методы в управлении качеством. М. : Финансы и статистика ; ИНФРА-М, 2009. 302 с.
13. О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации : постановление Правительства РФ № 806 от 17.08.2016 (ред. от 21.03.2019). Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локальной сети.
14. Об утверждении методических указаний по расчету вероятности отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования и оценки последствий такого отказа : приказ Министерства энергетики Российской Федерации № 123 от 19.02.2019 г. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локальной сети.
15. Лубков Н.В. К вопросу оценки ресурса технических систем // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 : сб. тр. конф. М., 2014. С. 7627–7633.
16. ГОСТ Р ИСО 17359-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство. Введ. 2015–10–20. М. : Стандартиформ, 2019. 28 с.
17. Фандеев В.П., Тутушкин В.И. Методический подход к выбору диагностических параметров для прогнозирования технического состояния электронных приборов и аппаратуры // Известия вузов Поволжского региона: Технические науки. 2011. № 3. С. 124–131.
18. Планирование технического перевооружения и реконструкции оборудования. Расчет варианта технического воздействия : стандарт ОАО «ГидроОГК. М. : ОАО «ГидроОГК». 68 с.
19. ГОСТ Р 55234.3-2013. Практические аспекты менеджмента риска. Процедуры проверки и технического обслуживания оборудования на основе риска. Введ. 2014–12–01. М. : Стандартиформ, 2014. 56 с.

References

1. Pravila organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya, zdanii i sooruzhenii elektrostantsii i setei: SO 34.04.181-2003 [Rules for the organization of maintenance and repair of equipment, buildings and structures of power plants and networks SO 34.04.181-2003]. Moscow, 2004. 454 p.
2. Stenin V.A., Berkovich Ya.D. K voprosu uvelicheniya mezhremontnogo perioda energooborudovaniya [On the issue of increasing the inter-repair period of power equipment]. *Elektricheskie stantsii* [Electric power stations], 1988, no. 7, pp. 58–60.

3. Andryushin A.V., Stenin V.A., Timoshenko N.I., Tereshchenko O.G. Puti sovershenstvovaniya sistemy remonta energeticheskikh ustanovok [Ways to improve the repair system of power plants]. *Vestnik MEI* [Bulletin of the Moscow Energetic Institute], 1997, no. 3, pp. 27–31.
4. Nazarychev A.N. Metody i modeli optimizatsii remonta elektrooborudovaniya ob"ektov energetiki s uchetom tekhnicheskogo sostoyaniya [Methods and models for optimizing the repair of electrical equipment of energy facilities taking into account the technical condition]. Ivanovo: IGEU Publ., 2002. 168 p.
5. Fujiyama K., Saito K. Metod prognozirovaniya optimal'nykh intervalov remonta i ob'emov remonta korpusov parovykh turbin na osnove statisticheskogo analiza dannykh o dline treshchiny [A method for predicting optimal repair intervals and repair volumes of steam turbine housings based on statistical analysis of crack length data]. *Zhurnal Obshchestva materialovedeniya* [Journal of the Society of Materials Science], 2014, vol. 63 (8), pp. 608–613.
6. Malkin V.S. Tekhnicheskaya diagnostika [Technical diagnostics]. Moscow: Lan' Publ., 2013.
7. Safarbakov A.M., Luk'yanov A.V., Pakhomov S.V. Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki detalei i oborudovaniya. Chast' 1 [The basics of technical diagnostics of parts and equipment. Part 1]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2007. 128 p.
8. Lyubimov I.V., Meshkov S.A. Statisticheskie metody kontrolya kachestva i nadezhnosti tekhnicheskikh sistem [Statistical methods for quality control and reliability of technical systems]. Saint Petersburg: BGTU Publ., 2010. 93 p.
9. Sibikin Yu.D., Sibikin M.Yu. Diagnostika i tekhnicheskoe obsluzhivanie elektroustanovok potrebiteli [Diagnostics and maintenance of electrical consumers]. Moscow: NTs ENAS Publ., 2016. 392 p.
10. Barsukov S.V., Pakhomov S.V., Loginova N.S. Model' tekhnicheskogo obsluzhivaniya ob'ekta sistemy zheleznodorozhnogo transporta «po tekhnicheskomu sostoyaniyu» na osnovanii diagnostirovaniya metodom minimal'nogo riska [The model of maintenance of the object of the railway transport system «according to the technical condition» based on the diagnosis by the method of minimal risk]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2017, vol. 2, pp. 609–612.
11. Barsukov S., Pakhomov S. Forecast model for estimating the service life of a diagnosed object based on the Neyman-Pearson method. 10th International Scientific and Technical Conference «Polytransport Systems». Tomsk, 2018, vol. 216, P. 03011.
12. Klyachkin V.N. Statisticheskie metody v upravlenii kachestvom [Statistical methods in quality management]. Moscow: Finansy i statistika; INFRA-M Publ., 2009. 302 p.
13. Postanovlenie Pravitel'stva RF N 806 ot 17.08.2016 (red. ot 21.03.2019) «O primenении risk-orientirovannogo podkhoda pri organizatsii otdel'nykh vidov gosudarstvennogo kontrolya (nadzora) i vnesenii izmenenii v nekotorye akty Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii» [Decree of the Government of the Russian Federation No 806 dated August 17, 2016 (ed. dated March 21, 2019) «On the application of a risk-based approach in the organization of Certain Types of state control (supervision) and Amendments to Certain Acts of the Government of the Russian Federation»].
14. Prikaz Ministerstva energetiki Rossiiskoi Federatsii № 123 ot 19.02.2019 g «Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazanii po raschetu veroyatnosti otkaza funktsional'nogo uzla i edinitsy osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya i otsenki posledstviy takogo otkaza» [The order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No 123 dated February 19, 2019 «On approval of methodological guidelines for calculating the probability of failure of a functional unit and a unit of basic technological equipment and assessing the consequences of such a failure»].
15. Lubkov N.V. K voprosu otsenki resursa tekhnicheskikh sistem [On assessment of the resource of technical systems]. *Sbornik trudov konferentsii «XII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014»* [Proceedings «XII All-Russia meeting on control problems»]. Moscow, 2014, pp. 7627–7633.
16. GOST R ISO 17359-2015 Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Obshchee rukovodstvo [State Standard R ISO 17359-2015 Condition monitoring and diagnostics of machines. General guidance]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 28 p.
17. Fandeev V.P., Tutushkin V.I. Metodicheskii podkhod k vyboru diagnosticheskikh parametrov dlya prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya elektronnykh priborov i apparatury [Methodical approach to the choice of diagnostic parameters for predicting the technical condition of electronic devices and equipment]. *Izvestiya vuzov Povolzhskogo regiona: Tekhnicheskie nauki* [Bulletins of high educational organizations of the Volga region: Technical sciences], 2011, no. 3, pp. 124–131.
18. Standart OAO «GidroOGK» «Planirovaniye tekhnicheskogo perevoorzheniya i rekonstruksii oborudovaniya. Raschet varianta tekhnicheskogo vozdeistviya» [Standard of JSC «Gidrogk» «Planning of technical re-equipment and reconstruction of equipment. Calculation of the technical impact option»]. Moscow: JSC «Gidrogk» Publ., 68 p.
19. GOST R 55234.3-2013 Prakticheskie aspekty menedzhmenta riska. Protседury proverki i tekhnicheskogo obsluzhivaniya oborudovaniya na osnove riska [State Standard R 55234.3-2013 Practical aspects of risk management. Risk-based equipment inspection and maintenance procedures]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 56 p.

Информация об авторах

Барсуков Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: bars_irkutsk@mail.ru.
Пахомов Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: psv1960@mail.ru.

Information about the authors

Sergei V. Barsukov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: bars_irkutsk@mail.ru.
Sergei V. Pakhomov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: psv1960@mail.ru.

Анализ обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах в Российской Федерации

Г.Г. Ахмедзянов¹✉, А.Д. Галеев¹, М.В. Ключников¹, А.В. Литвинов²

¹Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

²Омская академия Министерства внутренних дел России, г. Омск, Российская Федерация

✉1zzzz1omsk@gmail.com

Резюме

В России на железнодорожных переездах ежегодно отмечается значительное число дорожно-транспортных происшествий. Большинство научных работ по теме безопасности движения на переездах посвящены совершенствованию их технического оснащения и обслуживания. Не существует способа полностью исключить дорожно-транспортные происшествия на железнодорожных переездах. Предметом исследования в данной статье является безопасность движения на железнодорожных переездах в Российской Федерации, а его цель заключается в анализе показателей обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах в России. В работе рассмотрены случаи дорожно-транспортных происшествий, произошедшие на железнодорожных переездах в Российской Федерации за период с 2011 по 2021 г. На основании полученных данных спрогнозировано количество дорожно-транспортных происшествий на 2022–2027 гг. Исследована линия тренда, отражающая тенденцию в изменении числа дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах в России. В качестве линии тренда использовался полином шестой степени. Представлены основные статистические данные для транспортной инфраструктуры и железнодорожных переездов для основных экономически развитых стран. Рассмотрена оценка безопасности движения на железнодорожных переездах, основанная на коэффициенте удельной аварийности (количество дорожно-транспортных происшествий на переездах на 100 тыс. чел.). Данная оценка не включает некоторые факторы, влияющие на аварийность на переездах. Предложен коэффициент опасности железнодорожных переездов, учитывающий количество переездов и автомобилей в стране. Самый высокий коэффициент опасности железнодорожных переездов имеют Турция и Украина, самый низкий – США и Евросоюз. По значению коэффициента опасности железнодорожных переездов Россия занимает четвертое место среди рассматриваемых стран. У России есть потенциал для повышения безопасности движения на железнодорожных переездах. Необходимо совершенствовать технические и организационные мероприятия.

Ключевые слова

железнодорожный переезд, безопасность движения, линейная регрессия, количество переездов, коэффициент опасности, дорожно-транспортное происшествие

Для цитирования

Анализ обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах в Российской Федерации / Г.Г. Ахмедзянов, А.Д. Галеев, М.В. Ключников, А.В. Литвинов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 153–161. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).153-161.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 24.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 26.12.2022 г.; принята к публикации: 27.12.2022 г.

Analysis of traffic safety at level crossings in the Russian Federation

G.G. Akhmedzyanov¹✉, A.D. Galeev¹, M.V. Klyuchnikov¹, A.V. Litvinov²

¹Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

²Omsk academy of the Ministry of Internal Affairs Russia, Omsk, the Russian Federation

✉1zzzz1omsk@gmail.com

Abstract

In the Russian Federation, a significant number of traffic accidents is observed annually at level crossings. Most of the scientific works and research on the topic of crossings are devoted to improving the technical equipment and maintenance of railway crossings. To date, there is no way to completely eliminate traffic accidents at level crossings. The subject of the study is traffic safety at level crossings in the Russian Federation. The purpose of the work is to analyze the provision of traffic safety at level crossings in the Russian Federation. The article considers cases of traffic accidents at level crossings in the Russian Federation for the period from 2011 to 2021, and based on these data, a forecast is made for the number of traffic accidents at level crossings in the Russian Federation for the period from 2022 to 2027. The trend line reflecting the trend in the number of traffic accidents at level crossings has been studied. A polynomial of the sixth degree is chosen as the trend line. Also presented are basic statistics for transport infrastructure and railroad crossings for the main large and economically developed countries. An assessment of traffic

safety based on the specific accident rate at level crossings (number of traffic accidents at level crossings per one hundred thousand people) is considered. This assessment was recognized as inaccurate, since it does not take into account the main factors affecting the accident rate at crossings. A hazard coefficient for level crossings is proposed, taking into account the number of crossings and cars in a particular country. The highest risk factor for level crossings was obtained for Turkey and Ukraine, the lowest for the USA and the European Union. According to the value of the hazard coefficient of level crossings, Russia ranks fourth among the countries under consideration. Russia has potential in increasing technical and organizational measures to improve traffic safety at level crossings.

Keywords

level crossing, traffic safety, linear regression, number of crossings, hazard coefficient, traffic accident

For citation

Akhmedzyanov G.G., Galeev A.D., Klyuchnikov M.V., Litvinov A.V. Analiz obespecheniya bezopasnosti dvizheniya na zheleznodorozhnykh pereyezdash v Rossiiskoi Federatsii [Analysis of traffic safety at level crossings in the Russian Federation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 153–161. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).153-161.

Article info

Received: October 24, 2022; Revised: December 26, 2022; Accepted: December 27, 2022.

Введение

Развитие общества предполагает экспоненциальный рост потребления товаров и услуг. Это требует интенсивного развития науки, промышленности и транспорта. Но зачастую транспортная инфраструктура, созданная в прошлом веке, не успевает за растущими объемами перевозок. В ней возникают проблемные места, выступающие в роли ограничителей общего прогресса. Одной из таких проблем в сфере транспорта являются железнодорожные переезды [1–3]. Переезды представляют собой точки пересечения двух транспортных систем, возникающие на них нештатные ситуации приводят к значительным финансовым потерям. Еще одной проблемой является большое количество переездов по всей сети дорог (10 337 переездов на 1 сентября 2022 г.). Это не позволяет быстро осуществить их техническую модернизацию, так как требует значительных финансовых затрат, сопоставимых с годовым бюджетом страны.

Для совершенствования организации работы существующих железнодорожных переездов необходимо оценить текущую ситуацию с безопасностью на переездах и выполнить прогноз состояния безопасности на ближайшие годы.

Основным средством, обеспечивающим безопасную эксплуатацию железнодорожного переезда, является система сигнализации и ограждения переезда, входящая в железнодорожный переездный комплекс. Техническое оснащение железнодорожного переездного комплекса определяется категорией железнодорожного переезда и зависит от интенсивно-

сти движения автомобильного и железнодорожного транспорта. Отдельные шаги по модернизации железнодорожных переездных комплексов, включающие внедрение противотаранов, систем видеонаблюдения и передачи видеоизображения с переезда машинисту, носят точечный характер и не позволяют добиться значительного снижения количества инцидентов на железнодорожных переездах [4–9]. Важно изучать опыт других стран с развитой железнодорожной сетью и использовать его для организации безопасного движения на железнодорожных переездах России.

Материалы и методы исследования

Для оценки актуальности рассматриваемой проблемы необходимо выполнить анализ текущей ситуации с безопасностью на железнодорожных переездах в Российской Федерации и построить прогноз развития ситуации на ближайшее время. В качестве метода оценки текущей ситуации с обеспечением безопасности на железнодорожных переездах в России выбран элемент технического анализа в форме линии тренда. Линия тренда представляет собой геометрическое отображение средних значений анализируемых показателей, полученное с помощью математической функции. В качестве функции для линии тренда использовался полином шестой степени. Для прогноза динамики развития ситуации с обеспечением безопасности на железнодорожных переездах был выбран метод линейной регрессии. Исходными данными для анализа выступали статистические сведения по дорожно-транспортным про-

исшествиям (ДТП) на железнодорожных переездах в Российской Федерации за 2015–2020 гг. Для сравнения ситуации с обеспечением безопасности на железнодорожных переездах в России и других развитых странах использовались коэффициент удельной аварийности на переездах и коэффициент опасности железнодорожных переездов.

Результаты исследования и их обсуждение

Для анализа обеспечения безопасности на железнодорожных переездах в Российской Федерации необходимо проследить динамику количества случаев ДТП на переездах и выполнить прогноз развития ситуации на ближайшие годы. Также важно оценить место, которое занимает Россия, в вопросе обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах относительно других крупных и экономически развитых стран.

Задача прогнозирования заключается в вычислении будущих значений по существующим значениям. Предсказываемое значение Y , соответствующее заданному значению X . Значения X и Y известны. Новое значение предсказывается с использованием метода линейной регрессии.

Уравнение для функции прогноза P имеет вид:

$$P = a + bx,$$

где a равно:

$$a = \bar{y} - b\bar{x},$$

b равно:

$$b = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum(x - \bar{x})^2},$$

\bar{x} – средние значения выборок известных значений x ; \bar{y} – средние значения выборок известные значений y .

Для прогнозирования необходимы данные о происшествиях на переездах за прошлые года. Количество случаев ДТП на переездах за год взято для периода 2011–2021 гг. Этот период наиболее полно отражает текущую ситуацию с безопасностью и техническим оснащением железнодорожных переездов в Российской Федерации. Результаты прогнозирования и диапазон значений для прогноза представлены в табл. 1.

На рис. 1 показано количество ДТП на железнодорожных переездах в России с 2011 по 2021 г. и прогноз динамики количества ДТП на

Таблица 1. Количество дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах в Российской Федерации по годам и прогноз динамики их количества на период до 2027 г.

Table 1. The number of accidents at level crossings in the Russian Federation by years and the forecast for the dynamics of the number of accidents for the period up to 2027

Год Year	Количество дорожно-транспортных происшествий Number of traffic accidents	Прогноз количества дорожно-транспортных происшествий Forecast for the number of accidents	Диапазон для прогноза Forecast range
2011	228	–	–
2012	256	–	–
2013	273	–	–
2014	263	–	–
2015	240	–	–
2016	211	–	–
2017	263	–	–
2018	259	–	–
2019	248	–	–
2020	204	–	–
2021	219	–	–
2022	–	225	2011–2021 гг.
2023	–	215	2012–2021 гг., 2022 г.
2024	–	209	2013–2021 гг., 2022–
2025	–	207	2014–2021 гг., 2022–
2026	–	205	2015–2021 гг., 2022–
2027	–	200	2016–2021 гг., 2022–

период до 2027 г. Видно, что в ближайшее время невозможно добиться существенного снижения количества ДТП на переездах. Так, за шесть лет прогнозируемое число ДТП (прогноз на 2027 г. – 200 случаев) сократится всего на 8,7 % относительно 2021 г. (219 случаев).

Для оценки динамики количества ДТП на железнодорожных переездах удобно использовать технический анализ. Для исследования выбран такой инструмент технического анализа, как линия тренда. Линия тренда представляет собой геометрическое отображение средних значений анализируемых показателей (в нашем случае суммарное количество ДТП на железнодорожных переездах в России за отдельный год), полученное с помощью определенной математической функции. В качестве линии тренда для нашего исследования целесообразно использовать полином (многочлен, степенная функция). Полиномиальные тренды применяются для описания значений временных рядов, попеременно возрастающих и убывающих. Полином подходит для анализа большого набора данных нестабильной величины (например, явлений, циклически меняющихся в течение года). Для построения линии тренда применяется полином от одной переменной (в нашем случае отдельный год, для которого оценивается количество ДТП). Степень полинома определяет количество экстремумов (пиков). Поскольку график динамики количества ДТП на железнодорожных переездах в Российской Федерации (см. рис. 1) имеет шесть точек экстремума

(2011, 2013, 2016, 2017, 2020, 2021 гг.) предлагается в качестве линии тренда выбрать полином шестой степени:

$$y(x) = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + fx^2 + gx + h,$$

где $y(x)$ – многочлен, описывающий линию тренда динамики значений ежегодных ДТП на железнодорожных переездах в России; x – год, в котором произошли ДТП; a – коэффициент шестой степени переменной x ; b – коэффициент пятой степени переменной x ; c – коэффициент четвертой степени переменной x ; d – коэффициент третьей степени переменной x ; f – коэффициент второй степени переменной x ; g – коэффициент переменной x ; h – нулевой коэффициент.

Для рассматриваемых данных о количестве ДТП на переездах в России за отдельные годы формула полинома будет иметь вид:

$$y(x) = 0,0331 \cdot x^6 - 1,1293 \cdot x^5 + 14,633 \cdot x^4 - 89,468 \cdot x^3 + 259,4 \cdot x^2 - 311,33 \cdot x + 355,91.$$

Линия тренда, построенная с помощью полинома шестой степени, показана на рис. 1 пунктирным обозначением. Данная линия точно описывает динамику количества ДТП на железнодорожных переездах в Российской Федерации по годам.

Полученный тренд совпадает с результатами прогноза. Он также показывает отсутствие устойчивой тенденции к снижению числа ДТП на железнодорожных переездах в России в период с 2011 по 2021 г. Например, после минимума 2016 г. (211 случаев) на следующий год наблюдается рост на 25 % (263 случая).

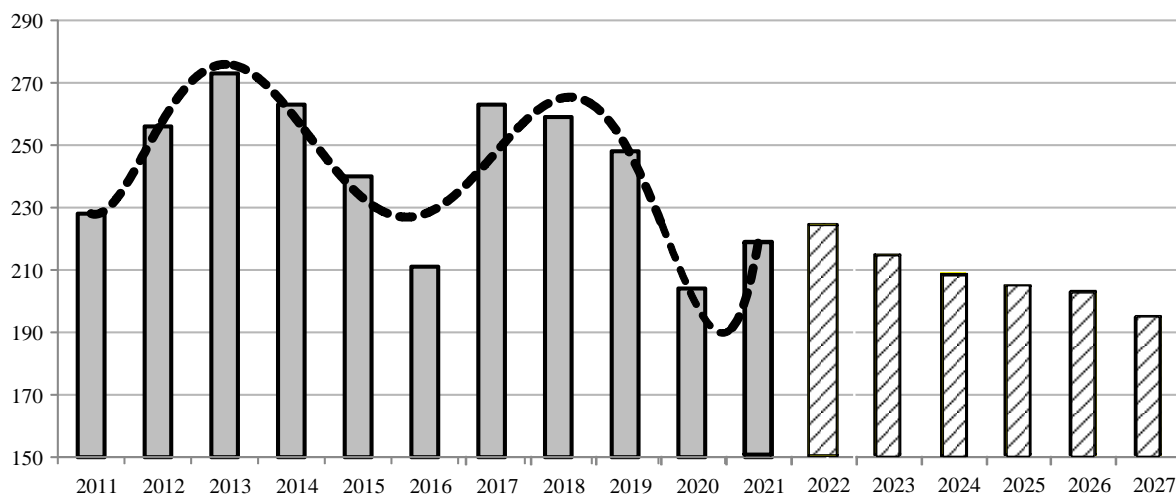


Рис. 1. Количество дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах в Российской Федерации по годам и прогноз динамики их количества на период до 2027 г.

Fig. 1. The number of accidents at level crossings in the Russian Federation by years and the forecast for the dynamics of the number of accidents for the period up to 2027

Для оценки обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах в Российской Федерации важно знать место по количеству ДТП на железнодорожных переездах, которое занимает Россия по сравнению с другими крупными и экономически развитыми странами мира. Для сравнения выбирались страны с развитой железнодорожной сетью, большим населением и автопарком, современной экономикой. В качестве стран рассматривались США, Италия, Германия, Франция, Бразилия, Индия, Англия, Украина, Турция и Европейский союз в целом. Такие страны, как Китай и Япония не попали в список в связи со сложностью иероглифического алфавита и поиска информации на нем. Необходимые пара-

метры, характеризующие выбранные страны и их транспортные системы на 2021 г., брались из открытых международных источников, а также на основании данных Википедии и научных исследований по данному вопросу [10–15]. В качестве параметров, характеризующих ситуацию с безопасностью движения на железнодорожных переездах отдельных стран, выбраны следующие данные:

- количество ДТП на железнодорожных переездах;
- число железнодорожных переездов;
- количество автомобилей;
- общая протяженность железных дорог в стране (табл. 2).

Существующая мировая оценка безопасно-

Таблица 2. Параметры для оценки безопасности железнодорожных переездов группы стран на 2021 г
Table 2. Parameters for assessing the safety of level crossings of a group of countries for 2021

Страна Country	Количество дорожно-транспортных происшествий на переездах Number of accidents at level crossings	Население, млн чел. Population, mln people	Коэффициент удельной аварийности на переездах Specific accident rate at crossings	Длина железных дорог, тыс. км Length of railways, thsnd km	Количество переездов Number of crossings	Количество автомобилей, млн Number of vehicles, mln	Коэффициент опасности переезда Crossing hazard ratio
США USA	2 148	337	63,7	250	212 000	275	3,7
Европейский союз EU	1 200	447	26,8	200	108 196	246	4,5
Италия Italy	9	59	1,5	16	4518	39	5,0
Германия Germany	140	84	16,7	39	22 201	48	13,0
Англия Gr. Britain	50	67	7,5	16	7 300	32	20,9
Бразилия Brazil	46	214	2,1	29	4 500	46	22,1
Франция France	121	65	18,6	27	10 500	38	29,8
Россия Russia	219	146	15,0	122	10 337	45	46,8
Индия India	1 788	1 422	12,6	70	31 846	74	75,4
Украина Ukraine	45	44	10,2	19	4 945	9	93,8
Турция Turkey	65	88	7,4	10	2 681	25	96,2
Среднее Значение Average	486	270	18,0	63	34 924	73	18,9

сти движения на железнодорожных переездах, использующая коэффициент удельной аварийности на железнодорожных переездах (количество ДТП на переездах на 100 тыс. населения), не всегда корректна. Например, количество единиц автомобильного транспорта на 100 тыс. населения может значительно отличаться в разных странах в зависимости от экономического развития и государственной политики. Также необходимо учитывать фактор развития транспортной инфраструктуры в отдельных странах.

Для сравнения стран между собой по безопасности движения на железнодорожных переездах предложен коэффициент опасности железнодорожных переездов (K). Поскольку общее количество автомобилей в стране влияет сильнее на аварийность на железнодорожных переездах, чем численность населения, будем использовать этот параметр при расчете K . Общая протяженность автомобильных и железных дорог также определяет аварийность на железнодорожных переездах, но намного точнее использовать количество железнодорожных переездов в стране, как величину, зависящую сразу от обоих этих параметров. Коэффициент опасности железнодорожных переездов (K) рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{D}{A \cdot N} \cdot 10^{11},$$

где D – общее количество ДТП на железнодорожных переездах в стране за 2021 г.; A – общее количество автомобилей в стране; N – количество железнодорожных переездов в стране.

Полученные значения коэффициента опасности железнодорожных переездов представлены в табл. 2. Страны в таблице расположены по возрастанию коэффициента опасности железнодорожных переездов. Таким образом, наиболее безопасная ситуация с движением на железнодорожных переездах наблюдается в США и в целом в Европейском союзе, наиболее опасная – в Турции и на Украине. Значения коэффициента опасности железнодорожных переездов в Турции и в США отличается в 26 раз, следовательно, существует значительная разница в транспортной инфраструктуре этих стран и в отношении к организации безопасного движения на железнодорожных переездах. График распределения стран по коэффициенту опасности железнодорожных переездов показан на рис. 2. Страны расположены по возрастанию коэффициента опасности слева направо.

Также на этом рисунке показаны значения коэффициента удельной аварийности на переездах рассматриваемых стран. Из графика видно, что распределение мест в общем списке между странами по значениям коэффициента опасности железнодорожных переездов и коэффициента удельной аварийности на железнодорожных переездах сильно различаются. Если сравнивать результаты с международными оценками, то видно, что коэффициент опасности железнодорожных переездов точнее показывает сложившуюся на сегодня ситуацию с аварийностью на переездах в рассматриваемых странах.

По значению коэффициента опасности железнодорожных переездов Российская Федерация занимает в общем списке четвертое место. Причем значение коэффициента K (46,81) для России выше среднего значения коэффициента K (18,92) для всей группы рассматриваемых стран в 2,5 раза. Следовательно, в России существует потенциал для совершенствования системы организации движения на железнодорожных переездах, разработки технических и организационных мероприятий, внедрения новых комплексов обеспечения безопасности на переездах, проведения воспитательных и дисциплинарных мероприятий с водителями автомобильного транспорта. Также для улучшения текущей ситуации с безопасностью движения на железнодорожных переездах в Российской Федерации необходимо изучать опыт США и Европейского союза [16–22].

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Повышение безопасности движения на железнодорожных переездах является важной задачей. Железнодорожные переезды представляют собой один из наиболее уязвимых элементов современной транспортной системы.

2. Для анализа безопасности движения на переездах в Российской Федерации необходимо оценить динамику количества ДТП на железнодорожных переездах за последние годы и спрогнозировать развитие ситуации на ближайшие годы.

3. Прогнозирование методом линейной регрессии суммарного количества ДТП за год в Российской Федерации на период с 2022 по 2027 г. показало, что значительного снижения их количества маловероятно.



Рис. 2. График распределения стран по коэффициенту опасности железнодорожных переездов
Fig. 2. Distribution graph of countries according to the level crossings risk factor

4. Для оценки состояния безопасности движения на переездах в Российской Федерации важно сравнить рассматриваемую ситуацию с другими крупными и экономически развитыми странами: США, Италия, Германия, Франция, Бразилия, Индия, Англия, Украина, Турция и в целом Европейский союз.

5. В качестве показателя для сравнения стран между собой по безопасности движения на железнодорожных переездах использован коэффициент опасности железнодорожных переездов вместо коэффициента удельной аварийности железнодорожных переездов (отношение количества ДТП на железнодорожных переездах на 100 тыс. населения).

6. Сравнение между собой рассматриваемой

мой группы стран по коэффициенту опасности железнодорожных переездов показало, что Российская Федерация занимает четвертое место, опережая только Турцию, Украину и Индию. Значение коэффициента опасности железнодорожных переездов для России (46,7) выше среднего значения этого коэффициента для группы рассматриваемых стран (18,9) в 2,5 раза.

7. Результаты проведенного исследования показывают, что в России существует потенциал для повышения безопасности движения на железнодорожных переездах. Для улучшения текущей ситуации, связанной с безопасностью движения на железнодорожных переездах, России необходимо изучать опыт США и Европейского союза.

Список литературы

1. Сапожников В.В., Кокурин И.М., Кононов В.А. Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики. М.: Маршрут, 2006. 247 с.
2. Лисенков В.М., Бестемьянов П.Ф., Леушин В.Б. Системы управления движением поездов на перегонах. Ч. 1. Функциональные схемы систем. М.: УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2009. 159 с.
3. Устройства железнодорожной автоматики, телемеханики и связи Ч. 1. / Д.В. Шалягин, Н.А. Цыбуля, С.С. Косенко и др. М.: Маршрут, 2006. 587 с.
4. Ахмедзянов Г.Г., Дремин В.В. Исследование факторов, влияющих на работу железнодорожного переезда // Известия Транссиба. 2021. № 3. С. 130–138.
5. Баранов А.М., Литвинов А.В., Зубарев А.Н. Повышение безопасности дорожного движения на нерегулируемых железнодорожных переездах // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 6 (21). С. 120–125.
6. Демьянов В.В., Имарова О.Б., Скоробогатов М.Э. Состояние проблемы и методы обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2018. Т. 22. № 4 (135). С. 215–230.
7. Система оповещения о свободности железнодорожных переездов / М.Г. Комогорцев, Е.В. Непомнящих, Я.В. Клочков и др. // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 6. С. 26–28.

8. Лысенко Н.Н., Державин А.Н. Схема переезда с интенсивным движением автомашин // Мир транспорта. 2017. Т. 15. № 3 (70). С. 188–195.
9. The crash at Kerang: Investigating systemic and psychological factors leading to unintentional noncompliance at rail level crossings / P.M. Salmon, G.J.M. Read, N.A. Stanton et al. // Accident Analysis & Prevention. 2013. Vol. 50. Pp. 1278–1288.
10. Системы автоматизации и телемеханики на железных дорогах мира / Э. Андерс, Т. Берндт, И.Д. Долгий и др. М. : Интекст, 2010. 488 с.
11. Macioszek E., Kurek A., Kowalski B. Overview of safety at rail-road crossing in Poland in 2008-2018 // Transport problems. 2020, Vol. 15 (4). Part 1. Pp. 57–68.
12. Foreign objects intrusion detection using millimeter wave radar on railway crossings / C. Huiling, L. Fei, G. Dianzhu et al. // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC). Toronto, 2020. Pp. 2776–2781.
13. A Radio Based Intelligent Railway Grade Crossing System to Avoid Collision / S.M. Sheikh, Md.H. Mahbub, J.R. Khondker et al. // International Journal of Computer Science Issues. 2010. Vol. 7(6). Pp. 139–143.
14. Larue G.S., Naweed A., Rodwell D. The road user, the pedestrian, and me: Investigating the interactions, errors and escalating risks of users of fully protected level crossings // Safety Science. 2018. Vol. 110. Part B. Pp. 80–88.
15. Wireless Barrage on the Railway Crossing / M. Tomis, M. Dvorský, V. Stýskala // 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Prague, 2015. Pp. 129–133.
16. Комплексный учет параметров объектов инфраструктуры железной дороги, железнодорожного подвижного состава и автомобильного транспорта для обеспечения безопасности движения на переездах / Д.В. Ефанов, Г.В. Осадчий, Д.Г. Плотицкий и др. // Автоматика на транспорте. 2018. № 2. С. 167–194.
17. Хорошев В.В., Ефанов Д.В., Осадчий Г.В. Концепция полносвязного мониторинга инфраструктуры переездов // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 1 (74). С. 47–52.
18. Костаев А.В., Штенгель Ю.Ю. Неохраняемый переезд – зона внедрения современных технологий // Наука и образование транспорту. 2016. Т. 1. С. 214–216.
19. Baron W., Da Silva M. Effects of in-pavement lights on driver compliance with grade crossing safety equipment. Washington : U.S. Department of Transportation, 2019. 30 p.
20. Evans A.W. Fatal accidents at railway level crossings in Great Britain 1946–2009 // Accident Analysis & Prevention. 2011. Vol. 43 (5). Pp. 1837–1845.
21. Evans A.W. Fatal train accidents on Europe’s railways: 1980–2009 // Accident Analysis & Prevention. 2011. Vol. 43 (1). Pp. 391–401.
22. Ghazel M., El-Koursi E.-M. Two-half-barrier level crossings versus four-half-barrier level crossings: a comparative risk analysis study // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2014. Vol. 15 (3). Pp. 1123–1133.

References

1. Sapozhnikov V.V., Kokurin I.M., Kononov V.A. Eksploatatsionnye osnovy avtomatiki i telemekhaniki [Basics of Railway Signaling and Interlocking]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 247 p.
2. Lisenkov. V.M., Bestem’yanov P.F., Leushin V.B. Sistemy upravleniya dvizheniem poyezdov na peregonakh. Chast 1. Funktsional’nye skhemy sistem [Control systems for the railway interlocking. Part 1. Functional schemes of systems]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2009. 159 p.
3. Shalyagin D.V., Tsybulya N.A., Kosenko S.S., Volkov A.A., Borovkov Yu.G., Gorelik A.V., Tanygin Yu.I., Bestem’yanov P.F., Zenkovich Yu.I., Minakov E.Yu.. Ustroistva zheleznodorozhnoi avtomatiki, telemekhaniki i svyazi. Chast’ 1. [Railway signaling, interlocking and communication devices. Part 1]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 587 p.
4. Akhmedzyanov G.G., Dremin V.V. Issledovanie faktorov. vliyayushchikh na rabotu zheleznodorozhnogo pereyezda [Analysis of the factors affecting the operation of a level crossing]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2021, no. 3 (47), pp. 130–138.
5. Baranov A.M., Litvinov A.V., Zubarev A.N. Povysheniye bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na nereguliruyemykh zheleznodorozhnykh pereyezdakh [Improving the road safety at unregulated level crossings]. *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii* [Modern materials, equipment and technologies], 2018, no. 6 (21), pp. 120–125.
6. Dem’yanov V.V., Imarova O.B., Skorobogatov M.E. Sostoyaniye problemy i metody obespecheniya bezopasnosti dvizheniya na zheleznodorozhnykh pereyezdakh [State of the problem and methods of ensuring traffic safety at railway crossings]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 4 (135), pp. 215–230.
7. Komogortsev M.G., Nepomnyashchikh E.V., Klochkov Ya.V., Maryuhnenko V.S., Kirpichnikov K.A. Sistema opoveshcheniya o svobodnosti zheleznodorozhnykh pereezdov [Railroad Clearance Warning System]. *Put’ i putevoe hozyajstvo* [Track and track facilities], 2016, no. 6, pp. 26–28.
8. Lysenko N.N., Derzhavin A.N. Skhema pereezda s intensivnym dvizheniem avtomashin [Crossing with heavy traffic]. *Mir transporta* [World of transport], 2017, vol. 15, no. 3 (70), pp. 188–195.
9. Salmon P.M., Read G.J.M., Stanton N.A., Lenn’e, M.G. The crash at Kerang: Investigating systemic and psychological factors leading to unintentional noncompliance at rail level crossings. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, vol. 50, pp. 1278–1288.
10. Anders E., Berndt T., Dolgii I.D. et al. Sistemy avtomatiki i telemekhaniki na zheleznykh dorogakh mira [Automation and telemechanics systems on the railways of the world]. Moscow: Intekst Publ., 2010. 488 p.
11. Macioszek E., Kurek A., Kowalski B. Overview of safety at rail-road crossing in Poland in 2008-2018. *Transport problems*, 2020, vol. 15 (4), part 1, pp. 57–68.

12. Huiling C., Fei L., Dianzhu G., Yingze Y., Shuo L., Kai G., Aina Q., Chao H., Zhiwu H. Foreign objects intrusion detection using millimeter wave radar on railway crossings. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC). Toronto, 2020, pp. 2776–2781.
13. Sheikh S.M., Md. Mahbub H., Khondker J.R., Gazi M.R. A Radio Based Intelligent Railway Grade Crossing System to Avoid Collision. International Journal of Computer Science Issues, 2010, vol. 7 (6), pp. 139–143.
14. Larue G.S., Naweed A., Rodwell D. The road user, the pedestrian, and me: Investigating the interactions, errors and escalating risks of users of fully protected level crossings. Safety Science, 2018, vol. 110, part B, pp. 80–88.
15. Tomis M., Dvorský M., Stýskala V., Soural T., Krenzelok T., Michalek L. Wireless Barrage on the Railway Crossing. 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Prague, 2015, pp. 129–133.
16. Efanov D.V., Osadchii G.V., Plotnikov D.G., Khoroshev V.V. Kompleksnyi uchet parametrov ob'ektov infrastruktury zheleznoi dorogi. zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i avtomobil'nogo transporta dlya obespecheniya bezopasnosti dvizheniya na pereyездakh [Comprehensive accounting of the parameters of railway infrastructure facilities, railway rolling stock and road transport to ensure traffic safety at level crossings]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], 2018, no. 2 (4), pp. 167–194.
17. Khoroshev V.V., Efanov D.V., Osadchii G.V. Kontseptsiya polnosvyaznogo monitoringa infrastruktury pereyездov [The concept of fully connected monitoring of level crossings]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2018, no. 1 (47), pp. 47–52.
18. Kostaev A.V., Shtengel' Yu.Yu. Neokhranyaemy pereyезд – zona vnedreniya sovremennykh tekhnologii [Unguarded crossing is a zone for the introduction of modern technologies]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and education for transport], 2016, vol. 1, pp. 214–216.
19. Baron W., Da Silva M. Effects of in-pavement lights on driver compliance with grade crossing safety equipment. Washington: U.S. Department of Transportation, 2019. 30 p.
20. Evans A.W. Fatal accidents at railway level crossings in Great Britain 1946–2009. *Accident Analysis & Prevention*, 2011, vol. 43 (5), pp. 1837–1845.
21. Evans A.W. Fatal train accidents on Europe's railways: 1980–2009. *Accident Analysis & Prevention*, 2011, vol. 43 (1), pp. 391–401.
22. Ghazel M., El-Koursi E.-M. Two-half-barrier level crossings versus four-half-barrier level crossings: a comparative risk analysis study. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, vol. 15 (3), pp. 1123–1133.

Информация об авторах

Ахмедзянов Гаяз Гумарович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и телемеханики, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: 1zzzz1omsk@gmail.com.

Галеев Альберт Дамирович, старший преподаватель кафедры автоматизации и телемеханики, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: hakkicrew@gmail.com.

Ключников Максим Владимирович, инженер кафедры автоматизации и телемеханики, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: max.6855@yandex.ru.

Литвинов Артём Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры деятельности органов внутренних дел в особых условиях, Омская академия Министерства внутренних дел России, г. Омск; e-mail: artyom_hawk@mail.ru.

Information about the authors

Gayaz G. Akhmedzyanov, Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and telemechanics, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: 1zzzz1omsk@gmail.com.

Al'bert D. Galeev, Assistant Professor of the Department of Automation and telemechanics, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: hakkicrew@gmail.com.

Maksim V. Klyuchnikov, Engineer of the Department of Automation and telemechanics, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: max.6855@yandex.ru.

Artem V. Litvinov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Internal Affairs in special conditions, Omsk Academy of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Omsk; e-mail: artyom_hawk@mail.ru.

Применение методов конечных элементов при изготовлении изделий с помощью аддитивных технологий

Д.В. Осипов✉, П.Ю. Иванов, А.С. Ковшин, В.В. Пахомов

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

✉osipovdnor@mail.ru

Резюме

На сегодняшний день актуальным вопросом является повышение эффективности работы пневматических тормозов грузовых поездов и снижение их истощимости при циклических торможениях. Эффективная и безотказная работа тормозной системы грузовых поездов – ключевой вопрос повышения безопасности их движения и увеличения скорости. В связи с многократным ростом скорости движения, а также увеличением массы подвижного состава не модернизированной более 40 лет тормозная система является главным ограничением для дальнейшего роста скоростей движения и масс подвижного состава из-за невозможности обеспечения требуемой безопасности движения. Также от непродуктивной работы тормозной системы зависит количество отказов колесных пар по причине возникновения ползунов на поверхности катания в связи с истощимостью пневматических тормозов, что может привести к неэффективному отпуску тормозов. Это, в свою очередь, потребует дополнительного простоя отдельных единиц подвижного состава на период обточки колесных пар. Таким образом, существующая тормозная система нуждается в глубокой модернизации. Для достижения этих целей необходимо применение современных аддитивных технологий при прототипировании новых пневматических приборов, но при этом остается открытым вопрос прочности таких изделий. Данная статья посвящена исследованию проблем прочности изделий, изготовленных при помощи аддитивных технологий. При проведении эксперимента была нарушена целостность объекта путем воздействия сжатого воздуха на рабочие поверхности. На основе физических параметров применяемых материалов было проведено имитационное компьютерное моделирование воздействия давления на корпус редуктора при его работе.

Ключевые слова

эффективность тормозов, истощимость тормозной системы, двухтрубная тормозная система, пневматический редуктор, прототипирование, аддитивные технологии, компьютерное моделирование, метод конечных элементов

Для цитирования

Применение методов конечных элементов при изготовлении изделий при помощи аддитивных технологий / Д.В. Осипов, П.Ю. Иванов, А.С. Ковшин, В.В. Пахомов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 162–172. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).162-172.

Информация о статье

поступила в редакцию: 1.11.2022 г.; поступила после рецензирования: 23.11.2022 г.; принята к публикации: 24.11.2022 г.

Application of finite element methods in the manufacture of products using additive technologies

D.V. Osipov✉, P.Yu. Ivanov, A.S. Kovshin, V.V. Pakhomov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉osipovdnor@mail.ru

Abstract

To date, an urgent issue is to increase the efficiency of the pneumatic brakes of freight trains and reduce their depletion during cyclic braking. Efficient and trouble-free operation of the braking system of freight trains is a key issue of improving safety and speed. Due to the multiple increase in the speed of movement, as well as in the mass of rolling stock, the braking system, which has not been modernized for more than forty years, is a key limitation hindering further growth of movement speeds and masses of rolling stock due to the inability to ensure the required traffic safety. Also, the low efficiency of the braking system depends on the number of wheel set failures due to the occurrence of sliders on the rolling surface resulting from exhaustion, which can lead to inefficient release of brakes, which in turn will require additional downtime of individual units of rolling stock for the period of turning wheel sets. In this regard, the existing braking system needs a deep modernization. To achieve these goals, it is necessary to use modern additive technologies in prototyping new pneumatic devices, but the question of the strength of such products remains open. This article is devoted to the study of the strength of products manufactured using additive technologies. During the experiment, the integrity of the object was violated under the influence of compressed air on the working surfaces. In this regard, based on the physical parameters of the materials used, a simulated computer modeling of the effect of pressure on the gearbox housing during its operation was carried out.

Keywords

brake efficiency, exhaustion of the braking system, two-pipe braking system, pneumatic reducer, prototyping, additive technologies, computer simulation, finite element method

For citation

Osipov D.V., Ivanov P.Yu., Kovshin A.S., Pakhomov V.V. Primenenie metodov konechnykh elementov pri izgotovlenii izdelii s pomoshch'yu additivnykh tekhnologii [Application of finite element methods in the manufacture of products using additive technologies]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 162–172. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).162-172.

Article Info

Received: November 1, 2022; Revised: November 23, 2022; Accepted: November 24, 2022.

Введение

Проблема низкой эффективности современного пневматического автоматического тормоза грузового поезда кроется в сочетании функций питания и управления тормозами в одном воздуховоде тормозной магистрали. Вследствие этого при циклических торможениях система истощается, поэтому необходимо применять выдержку времени между торможениями для полной зарядки запасного резервуара и камер воздухораспределителей в режимах управления автоматическими тормозами [1]. Данная проблема решается внедрением дополнительной трубы питательной магистрали для питания запасного резервуара и разделения функций управления и питания [2–4]. Данное решение используется за рубежом и адаптировано к отечественным воздухораспределителям. Схема предлагаемой модернизации приведена на рис. 1.

Выбор способа изготовления и материала пневматического редуктора

Для работы такой системы необходимо наличие высокопроизводительного пневматического редуктора (Р), который будет обеспечивать через питательную магистраль (ПМ) дополнительное питание запасного резервуара (ЗР) сжатым воздухом. В процессе изготовления нового изделия только при использовании 3D-модели трудно обнаружить различные недостатки и ошибки, следовательно, необходимо обеспечить внедрение и применение инновационных технологий в процесс проектной деятельности, дающих возможность быстро изготовить изделия для оценки их эстетических и функциональных качеств [5]. С целью сокращения не только временных затрат, но и финансовых вложений, целесообразно применение современных аддитивных технологий [6]. Данные технологии позволяют использовать различные материалы, ис-

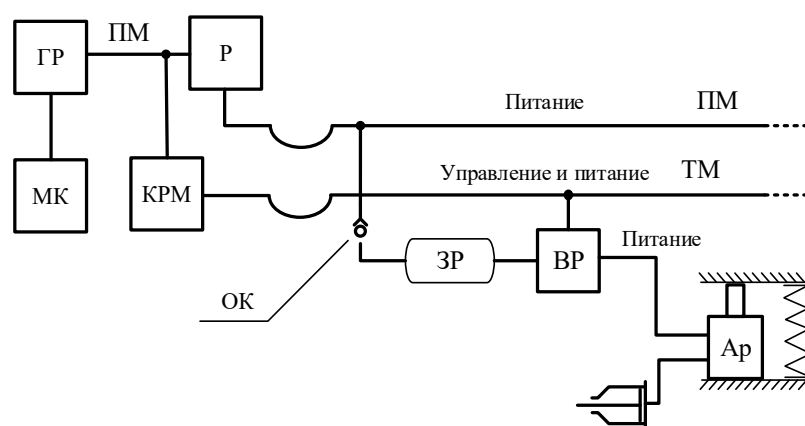


Рис. 1. Упрощенная схема двухтрубной пневматической тормозной системы для отечественного грузового подвижного состава:

ГР – главный резервуар; ПМ – питательная магистраль; ТМ – тормозная магистраль;
Р – редуктор; МК – мотор-компрессор; КРМ – кран машиниста; ОК – обратный клапан;
ЗР – запасный резервуар; ВР – воздухораспределитель; Ар – авторегулятор

Fig. 1. Simplified scheme of a two-pipe pneumatic braking system for domestic freight rolling stock
GR – main reservoir; PM – nutrient line; TM – brake line; R – reducer; МК – motor-compressor;
KRM – driver's crane; ОК – check valve; ZR – spare tank; VR – air distributor; Ar – auto-regulator

пользуя различные методы 3D-печати. Наиболее широкое распространение получила FDM-технология – способ послойного наплавления материала, представляющий собой пластиковый пруток, который подается в печатающую головку, где пластик нагревается и послойно наращивается на изделие. Для производства элементов конструкции пневматического редуктора технология была выбрана из-за простоты процесса изготовления, доступности оборудования, невысокой стоимости материала, высокой скорости печати и большого выбора исходных материалов [7–10].

Так как рабочее давление сжатого воздуха для редуктора составляет 0,9 МПа, то в качестве исходного материала для корпуса редуктора был выбран пластик PETG, поскольку этот материал обладает наиболее высокими прочностными характеристиками по сравнению с другими видами пластика. Готовая верхняя часть корпуса представлена на рис. 2.

Расчет прочности изделий, изготовленных при помощи аддитивных технологий методом конечных элементов

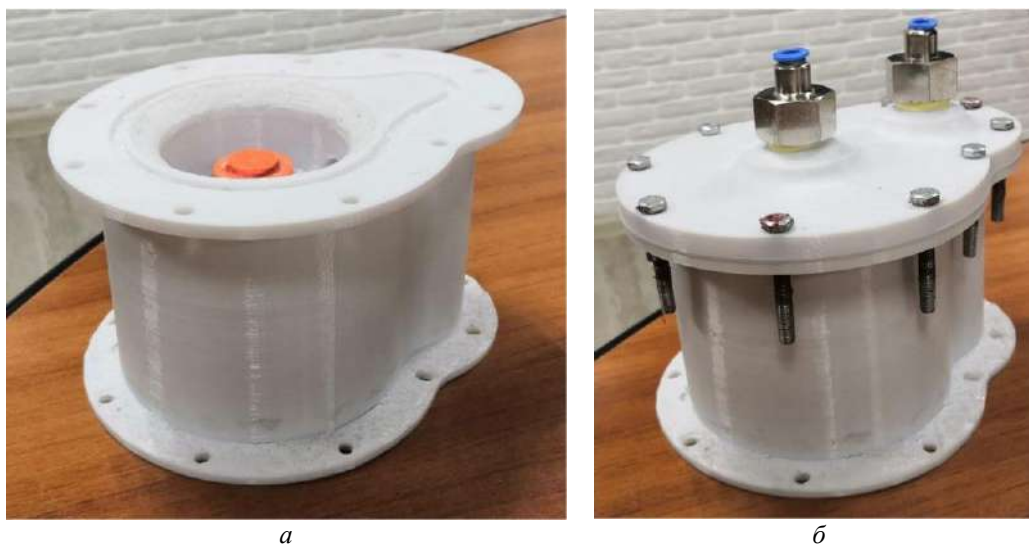
Основная причина отказа от изготовления прототипов, а далее и готовых продуктов из металла заключается в том, что такие изделия значительно дороже по себестоимости производства. Кроме того, они обладают повышенной массой. Для решения этой проблемы данную деталь изготовили пустотелой, с заполнением

внутреннего объема всего на 40 %. Но при этом совершенно очевидно, что минусом такого решения является снижение прочности готового изделия. С этой целью необходимо установить связь снижения прочности изделия в зависимости от заполнения изделий, изготовленных при помощи аддитивных технологий, а также возможность применения программного обеспечения Autodesk Inventor, для расчета напряженно-деформированного состояния объектов при помощи методов конечных элементов.

Суть метода конечных элементов заключается в разбиении поверхности физического тела на простые элементы различной формы и величины. В результате такого разбиения создается сетка из границ элементов, образуя узлы на пересечениях границ. В результате возникает числовая область решения, имеющая конечное число точек, что в конечном итоге приводит к созданию из простых уравнений более сложных их систем, позволяя решить поставленную задачу.

Для расчета прочности необходимо задать физико-механические свойства материала как в работе [11] (табл. 1).

Основным критерием, по которому можно оценить разрушится деталь или нет, является напряжения по Мизесу. Пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. В большинстве случаев, предел текучести используется в качестве пре-



а

б

Рис. 2. Часть корпуса пневматического редуктора:

a – без крышки; *б* – с крышкой и смонтированными переходниками

Fig. 2. Part of the pneumatic gearbox housing:

a – without a lid; *b* – with a lid and mounted adapters

Табл. 1. Физико-механические свойства PETG-пластика
Table 1. Physical and mechanical properties of PETG plastic

Показатель Indicator	Стандартные значения Standard values	Значения, принятые к расчету Values accepted for calculation
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	1,26–1,28	1,27
Прочность при растяжении, МПа Tensile strength, MPa	60–66	63
Предел текучести, МПа Yield strength, MPa	47,9–52,9	21
Модуль сдвига, МПа Shear modulus, MPa	1 240	1 240
Модуль Юнга, МПа Young's modulus, MPa	2 010–2 110	2 060
Коэффициент Пуассона Poisson's Ratio	0,42	0,42

дельного напряжения [12-16]. В данном случае предел текучести также будет использоваться в качестве предельного напряжения.

Недостатком использования вычислительных способностей Autodesk Inventor является то, что расчет проводится для полнотелого материала, по этой причине невозможно установить предел прочности для изделий с различной величиной заполнения внутреннего пространства. На основании проведенных исследований прочности ABS-пластика в зависимости от величины заполнения было выявлено, что предел прочности снижается пропорционально степени заполненности пространства внутри исследуемых образцов [17-20]. Следовательно, если корпус редуктора заполнен материалом на 40 %, то его предел прочности снизится приблизительно на 60 %. Таким образом, установим окончательный предел прочности, равный 21 МПа. Далее для точности расчетов были заданы следующие параметры сетки (табл. 2).

При износе прокладок сжатый воздух будет создавать силу, действующую на всю по-

верхность фланцев, что приведет к разрушению редуктора (самому опасному случаю), поэтому моделироваться будет именно этот процесс. С целью обеспечения безопасности при проведении эксперимента ограничимся рабочим давлением в камере над клапаном – 0,6 МПа (рис. 3).

Тогда по закону Паскаля сила, действующая на фланцы корпуса, составит

$$F = P \cdot S,$$

где $P = 6 \text{ кгс/см}^2$ – давление сжатого воздуха; $S = 146 \text{ см}^2$ – площадь, на которую действует давление при нарушении плотности прокладки.

Таким образом,

$$F = 6 \cdot 146 = 876 \text{ кгс} = 8\,594 \text{ Н}.$$

Далее необходимо приложить нагрузки к стенкам камеры над клапаном и к фланцам корпуса (рис. 4). Силу, действующую на фланцы, направляем вверх, так как давление будет стремиться сорвать крышку, воздействуя через болты на фланцы.

По результатам моделирования напряжений наибольшие напряжения сконцентрированы в месте примыкания фланцев редуктора к

Табл. 2. Настройки сетки
Table 2. Grid settings

Показатель Indicator	Значение Value
Средний размер элементов, м Average size of elements, m	0,01
Минимальный размер элементов, м Minimum size of elements, m	0,2
Коэффициент разнородности Heterogeneity coefficient	1,5
Максимальный угол поворота, град. Maximum angle of rotation, deg.	60

его корпусу (рис. 5), а наибольшие напряжения по Мизесу составили 37–40 МПа, максимально допустимый предел текучести – 31 МПа. Наблюдается околонулевой запас прочности, следовательно, в этих местах произойдет разрушение корпуса редуктора.

Для подтверждения результатов расчета напряженно-деформированного состояния бы-

ла проведена проверка корпуса редуктора на прочность за счет подключения его к компрессорной установке для подачи сжатого воздуха. При воздействии давления 0,6 МПа на корпус редуктора зафиксировано разрушение корпуса в местах максимальных напряжений, соответствующих математическому моделированию процесса нагружения конструкции (рис. 6).

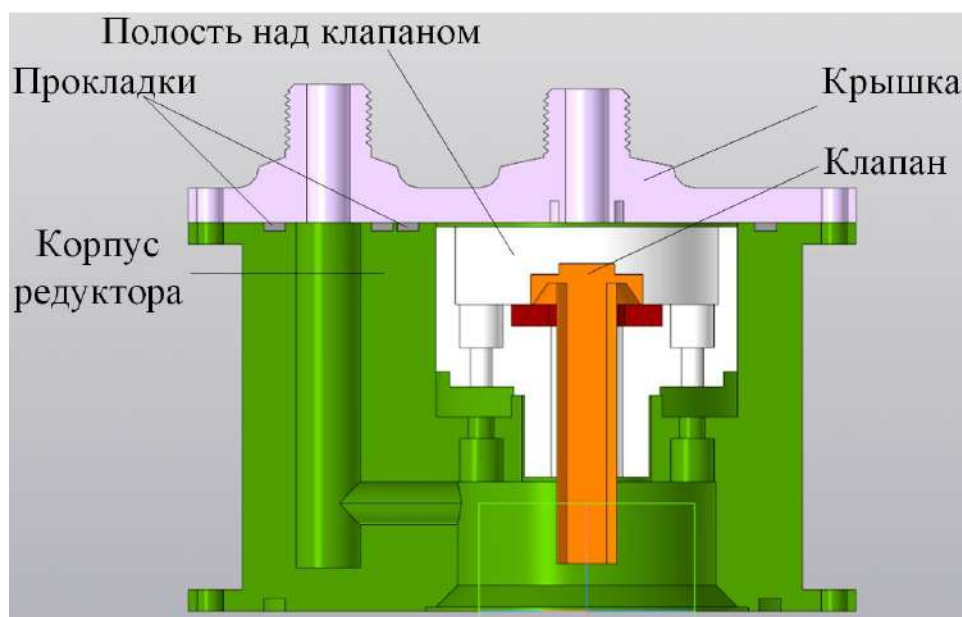


Рис. 3. Устройство верхней части пневматического редуктора
Fig. 3. The design of the upper part of the pneumatic gearbox

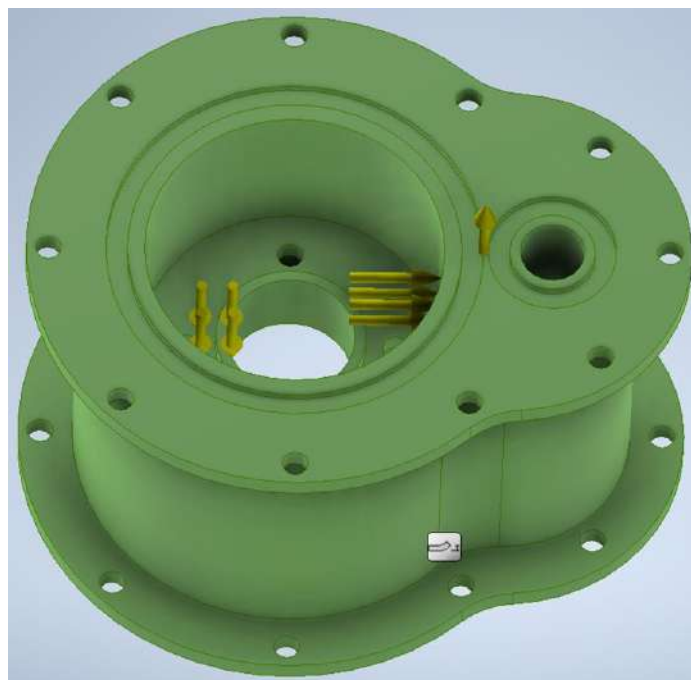


Рис. 4. Силы, воздействующие на корпус редуктора
Fig. 4. Forces affecting on the gearbox housing

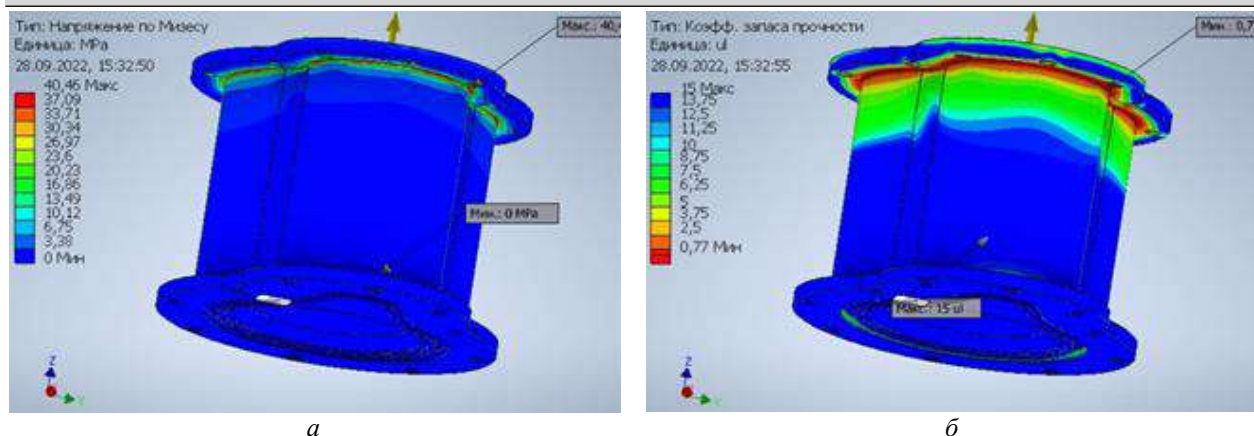


Рис. 5. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния корпуса редуктора:
a – напряжения по Мизесу; *б* – запас прочности

Fig. 5. The results of modeling the stress-strain state of the gearbox housing:
a – Mises stress; *b* – safety margin



Рис. 6. Разрушение корпуса редуктора в месте примыкания фланцев к основному телу
Fig. 6. Destruction of the gearbox housing at the junction of the flanges to the main body

Корпус первоначально предложенной формы не смог обеспечить работоспособность при давлении 0,9 МПа, разрушившись при давлении 0,6 МПа. Причем разрыв корпуса начался по линии максимальной концентрации напряжения и продолжился по диагонали над корпусом, что привело к полному отрыву фланцев (см. рис. 6). Форма разрыва указала на слабо проработанный стык фланца с корпусом, который имел резкий переход, концентрирующий напряжение, что достаточно ярко демонстрируют результаты расчетов. Принятым методом снижения концентрации напряжения является применение галтелей, обеспечивающих более плавный переход между плоскостями. В результате анализа и с учетом полученного результата было принято решение о необходимости внесения таких изменений в конструкцию корпуса, как увеличение толщины фланцев с 5 до 10 мм, а также создание галтели от основного корпуса к фланцам верхней части корпуса редуктора (рис. 7).

В ходе проведения аналогичного моделирования (рис. 8) было получено подтверждение

эффективности принятых изменений в конструкции, так как максимальное напряжение по Мизесу составило 10,6 МПа в местах наибольшей концентрации усилий и деформаций. Таким образом, обеспечивается более чем двукратный запас прочности в местах, подверженных наибольшим нагрузкам, т. е. модернизированный корпус сможет выдерживать рабочее давление до 1,2 МПа.

После получения удовлетворительных результатов моделирования, усиленный корпус был подключен к компрессорной установке и испытан при давлении 0,4 МПа. В ходе наблюдения за состоянием объекта под нагрузкой нарушения целостности выявлено не было. При повторном испытании показатель давления был увеличен до 0,6 МПа, что также не вызвало никаких повреждений (рис. 9). При нахождении под давлением 0,9 МПа, которое является номинальным для данного редуктора, в течение длительного времени также не произошло разрушение корпуса, что говорит о большом запасе прочности при правильном проектировании геометрии конструкции и учета нагруженных зон.

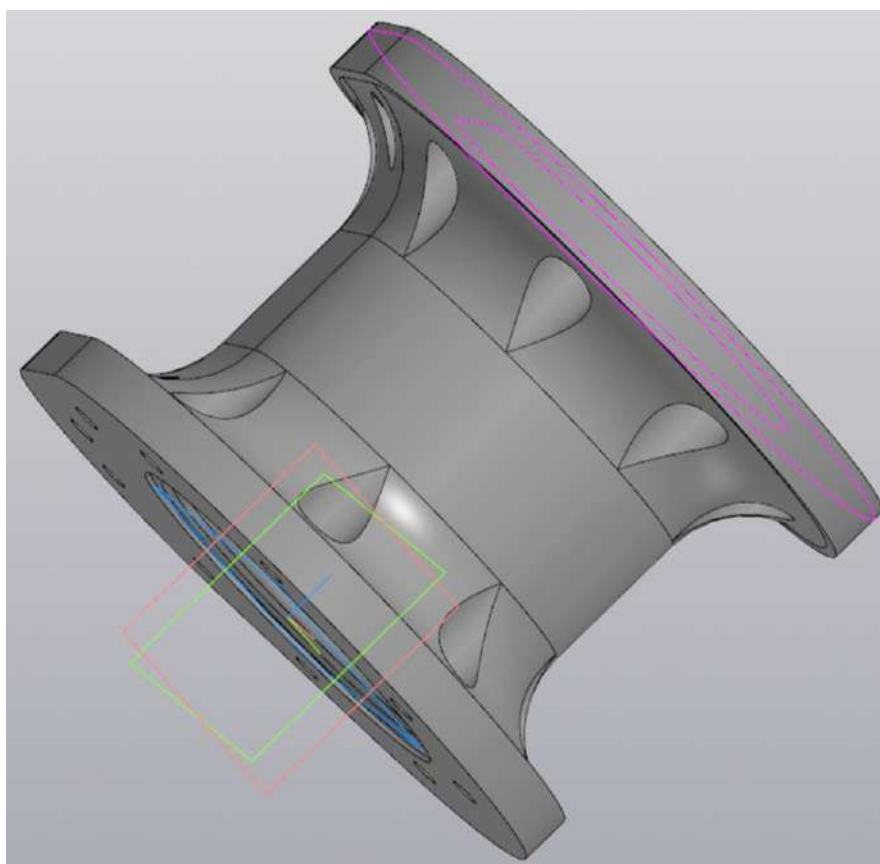


Рис. 7. Модернизированная верхняя часть корпуса редуктора
Fig. 7. Upgraded upper part of the gearbox housing

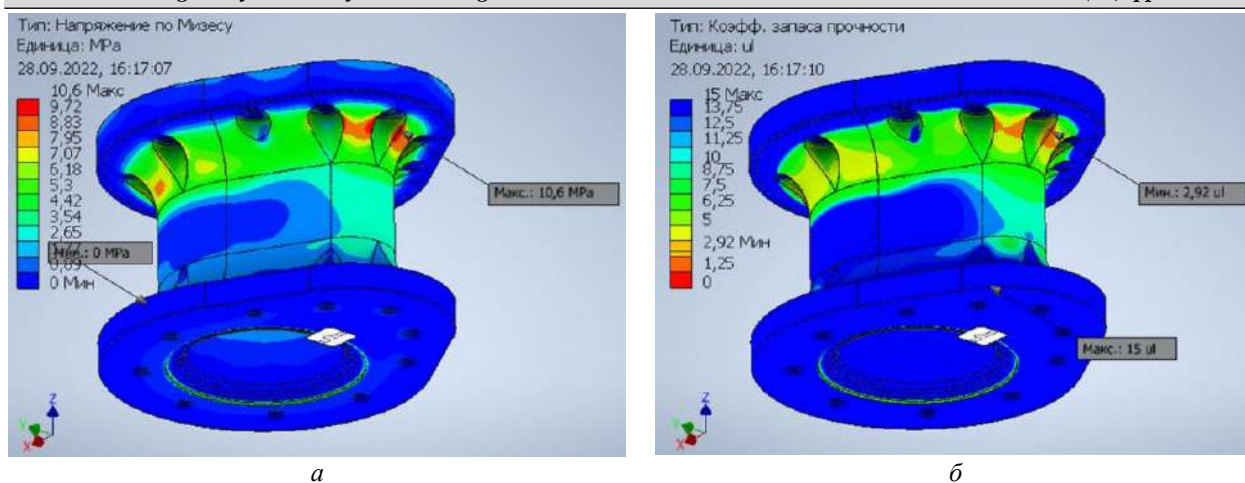


Рис. 8. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния усиленного корпуса редуктора:

а – напряжения по Мизесу; *б* – запас прочности

Fig. 8. The results of modeling the stress-strain state of the reinforced gearbox housing:
a – Mises stresses; *b* – safety margin



Рис. 9. Модернизированная часть корпуса пневматического редуктора

Fig. 9. Upgraded part of the pneumatic gearbox housing

Заключение

По результатам экспериментальных исследований и проведенного компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния корпусов редуктора, изготовленных при помощи аддитивных технологий, выявлено, что максимально допустимое напряжение снижается приблизительно на величину незаполненного пространства внутренней структуры. Однако при этом необходимо провести дополнительные исследования величины максимально допустимых

напряжений в зависимости от степени заполнения изделия и от настроек печати для уточнения данного вопроса. Также подтверждена высокая сходимость компьютерного моделирования с результатами экспериментальных исследований, что позволяет использовать программное обеспечение Autodesk Inventor для расчета пустотелых изделий, изготовленных при помощи аддитивных технологий.

Список литературы

1. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества (протокол от 6-7 мая 2014 г. № 60). Курган : Южн.-Урал. дирекция тяги, 2016. 162 с.
2. Зарубежный опыт повышения эффективности пневматических тормозов / П.Ю. Иванов, Е.Ю. Дульский, Н.И. Мануилов и др. // Локомотив. 2020. № 11 (767). С. 36–37.
3. Сравнительный анализ тормозных систем подвижного состава с однотрубным и двухтрубным питанием / П.Ю. Иванов, Е.Ю. Дульский, А.А. Хамнаева и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 3 (79). С. 35–42.
4. Пат. 2740624 Рос. Федерация. Двухтрубная тормозная система железнодорожного подвижного состава / П.Ю. Иванов, А.А. Хамнаева, А.М. Худоногов и др. № 2020121882 ; заявл. 26.06.2020 ; опубл. 18.01.2021, Бюл. № 2. 8 с.
5. Зотов О.Ю., Фролов Д.А. Особенности метода изготовления изделий путем послойного наплавления материала // Ученый XXI века. 2016. № 1 (14). С. 7–11.
6. Применение аддитивных технологий при проектировании и изготовлении автотормозного оборудования / Н.С. Горбунова, Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов и др. // Молодая наука Сибири. 2021. № 1 (11). С. 44–50. Электр. журн. URL <https://mnv.irgups.ru/en/node/754> (Дата обращения 15.10.2022).
7. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство / О.Н. Гончарова, Ю.М. Бережной, Е.Н. Бесарабов и др. // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4 (43). С. 123.
8. Эффективность использования аддитивных технологий как альтернативы традиционным субтрактивным технологиям при изготовлении сложных деталей из металла / А.С. Агафонцев, Н.Н. Вовк, Ю.В. Клевнов и др. // Тр. РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2017. № 22-2. С. 228–231.
9. Этгель В.А., Берг А.А., Иванов С.С. Исследование технологии производства деталей сложной конфигурации с помощью аддитивных технологий // Академическая наука - проблемы и достижения : материалы XV междунар. науч.-практ. конф. North Charleston, 2018. С. 41–43.
10. Исследование комплекса характеристик базовых материалов для FDM-технологии аддитивного синтеза. Физико-механические и теплофизические свойства / Г.Н. Петрова, М.М. Платонов, В.А. Большаков и др. // Пластические массы. 2016. № 5-6. С. 53–58.
11. Шумейко И.А., Зайченко Н.О. Анализ пластмасс при их выборе для 3D печати модели ветроэнергетической установки // Universum: технические науки. 2021. № 3-1 (84). С. 74–77.
12. Базуев С.В., Лукашук О.А. Исследование напряженно-деформированного состояния траверсы литейного крана // Молодой ученый. 2020. № 19 (309). С. 5–8.
13. Galoyan H.A. Geometry modification and analysis of the “butterfly” flexure pivot by the experimental and finite element methods // Mechanics, Machine science, Machine-building : proceedings National Polytechnic University of Armenia. 2020. № 1. P. 48–54.
14. Тигиев З.И., Хрестусь К.В., Дауров О.Э. Применение метода конечных элементов для решения инженерных задач // Вестн. науч. тр. молодых учёных, аспирантов, магистрантов и студентов ФГБОУ ВО «Горский государственный аграрный университет». 2018. Т. 55. Ч. IV. С. 231–233.
15. Дульский Е.Ю. Моделирование режимов ИК-энергоподвода в технологии продления ресурса тяговых электрических машин с использованием метода конечных элементов // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2013. № 12 (83). С. 258–263.
16. Балашов А.В., Маркова М.И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). С. 66.
17. Дремухин М.А., Наговицин В.Н. Разработка и моделирование неметаллической формообразующей оснастки для изготовления полимерных композиционных рефлекторов спутниковых антенн // Космические аппараты и технологии. 2021. Т. 5. № 4 (38). С. 183–190.
18. Крылов Д.В. Применение аддитивных технологий при производстве авиационных конструкций // XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых): Междунар. молодёж. науч. конф. Казань, 2017. Т. 1. С. 529–533.
19. Петров В.М., Безпальчук С.Н., Яковлев С.П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластика, получаемых методом 3D-печати // Вестн. гос. ун-та морск. и речн. флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 4. С. 765–776.
20. Кузнецов А.Е., Соколова В.М. Основные факторы, влияющие на прочность изделий при печати на 3D-принтере // Химия и химическая технология: достижения и перспективы : сб. материалов V Всерос. конф. Кемерово, 2020. С. 118.1–118.5.

References

1. Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva (protokol ot «6-7» maya 2014 g. № 60) [Rules for maintenance of brake equipment and brake control of railway rolling stock: approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States (Protocol No 60 dated May 6-7, 2014)]. Kurgan: Yuzhno-Ural'skaya direktsiya tyagi Publ., 2016. 162 p.
2. Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu., Manuilov N.I., Khudonogov A.M., Khamnaeva A.A., Korsun A.A., Novikov N.N., Treskin S.V. Zarubezhnyi opyt povysheniya effektivnosti pnevmaticheskikh tormozov [Foreign experience in improving the efficiency of pneumatic brakes]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2020, no. 11 (767), pp. 36–37.
3. Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu., Khamnaeva A.A., Korsun A.A., Treskin S.V. Sravnitel'nyi analiz tormoznykh sistem podvizhnogo sostava s odnotrubnym i dvukhtubnym pitaniem [Comparative analysis of braking systems of rolling stock with single-tube and two-tube power supply]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2020, no. 3 (79), pp. 35–42.
4. Ivanov P.Yu., Hamnaeva A.A., Hudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Manuilov N.I., Korsun A.A., Mayarchuk P.E., Treskin S.V. Patent RU 2740624 C1, 18.01. 2021.
5. Zotov O.Yu., Frolov D.A. Osobennosti metoda izgotovleniya izdelij putem poslojnogo naplavleniya materiala [Features of the method of manufacturing products by layer-by-layer deposition of material]. *Uchenyi XXI veka* [Scientist of XXI century], 2016, no. 1 (14), pp. 7–11.
6. Gorbunova N.S., Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Khamnaeva A.A., Novikov N.N. Primenenie additivnykh tekhnologii pri proektirovanii i izgotovlenii avtotormoznogo oborudovaniya [Application of additive technologies in the design and manufacture of auto-braking equipment]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2021, no. 1 (11), pp. 44–50. Available at: URL <https://mnv.irkups.ru/en/node/754> (Accessed October 15, 2022).
7. Goncharova O.N., Bereznoi Yu. M., Bessarabov E.N., Kadamov E.A., Gainutdinov T.M., Nagopet'yan, Kovina V.M. Additivnye tekhnologii – dinamichno razvivayushcheesya proizvodstvo [Additive technologies – dynamically developing production]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2016, no. 4 (43), pp. 123.
8. Agafontsev A.S., Vovk N.N., Klevnov Yu.V., Kolyanov A.N., Korepanov A.V., Koshkin V.V., Luchkin D.A., Mineichev M.V., Ovsov A.V., Sergeev D.V., Fomchenko V.N., Tsarev M.A. Effektivnost' ispol'zovaniya additivnykh tekhnologii kak al'ternativy traditsionnym subtraktivnym tekhnologiyam pri izgotovlenii slozhnykh detalei iz metalla [Efficiency of using additive technologies as an alternative to traditional subtractive technologies in the manufacture of complex metal parts]. *Trudy RFYAC-VNIIEF* [Proceedings of the Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics], 2017, no. 22-2, pp. 228–231.
9. Ettl' V.A., Berg A.A., Ivanov S.S. Issledovanie tekhnologii proizvodstva detalei slozhnoi konfiguratsii s pomoshch'yu additivnykh tekhnologii [Research of the production technology of parts of complex configuration using additive technologies]. *Materialy XV mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Akademicheskaya nauka – problemy i dostizheniya»* [Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference «Academic science – problems and achievements»]. North Charleston, 2018, pp. 41–43.
10. Petrova G.N., Platonov M.M., Bol'shakov V.A., Ponomarenko S.A. Issledovanie kompleksa kharakteristik bazovykh materialov dlya FDM-tekhnologii additivnogo sinteza. Fiziko-mekhanicheskie i teplofizicheskie svoystva [Investigation of the complex characteristics of base materials for FDM additive synthesis technology. Physico-mechanical and thermophysical properties]. *Plasticheskie massy* [Plastic masses], 2016, no. 5-6, pp. 53–58.
11. Shumeiko I.A., Zaichenko N.O. Analiz plastmass pri ikh vybore dlya 3D pechati modeli vetroenergeticheskoi ustanovki [Analysis of plastics when choosing them for 3D printing of a model of a wind power plant]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences], 2021, no. 3-1 (84), pp. 74–77.
12. Bazuev S.V., Lukashuk O.A. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya traversy liteinogo krana [Investigation of the stress-strain state of the casting crane traverse]. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist], 2020, no. 19 (309), pp. 5–8.
13. Galoyan H.A. Geometry modification and analysis of the «butterfly» flexure pivot by the experimental and finite element methods. Proceedings National Polytechnic University of Armenia. Mechanics, Machine science, Machine-building, 2020, no 1, pp. 48–54.
14. Tigiev Z.I., Hrestus' K.V., Daurov O.E. Primenenie metoda konechnykh elementov dlya resheniya inzhenernykh zadach [Application of the finite element method for solving engineering problems]. *Vestnik nauchnykh trudov molodykh uchenykh, aspirantov, magistrantov i studentov FGBOU VO «Gorskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet»* [Bulletin of proceedings of young scientists, postgraduates, undergraduates and students of the Gorsky State Agrarian University]. Vladikavkaz, 2018, vol. 55, part IV, pp. 231–233.
15. Dul'skii, E.Yu. Modelirovanie rezhimov IK-energopodvoda v tekhnologii prodleniya resursa tyagovykh elektricheskikh mashin s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov [Modeling of IR power supply modes in the technology of life extension of traction electric machines using the finite element method]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2013, no. 12 (83), pp. 258–263.
16. Balashov A.V., Markova M.I. Issledovanie struktury i svoystv izdelii, poluchennykh 3D-pechat'yu [Investigation of the structure and properties of products obtained by 3D printing]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2019, no. 1 (52), pp. 66.
17. Dremukhin M.A., Nagovitsin V.N. Razrabotka i modelirovanie nemetallicheskoj formoobrazuyushchei osnastki dlya izgotovleniya polimernykh kompozitsionnykh reflektorov sputnikovyykh antenn [Development and modeling of non-metallic shaping equipment for the manufacture of polymer composite reflectors of satellite antennas]. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii* [Spacecraft and technologies], 2021, vol. 5, no. 4 (38), pp. 183–190.

18. Krylov D.V. Primenenie additivnykh tekhnologii pri proizvodstve aviatsionnykh konstrukttsii [Application of additive technologies in the production of aircraft structures]. *Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «XXIII Tupolevskie chteniya (shkola molodykh uchennykh)»* [International Youth Scientific Conference «XXIII Tupolev Readings (School of Young Scientists)»]. Kazan', 2017, vol. 1, pp. 529–533.

19. Petrov V.M., Bezpal'chuk S.N., Yakovlev S.P. O vliyaniy struktury na prochnost' izdelii iz plastikov, poluchaemykh metodom 3D-pechati [On the influence of the structure on the strength of plastic products obtained by 3D-printing]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* [Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov], 2017, vol. 9, no. 4, pp. 765–776.

20. Kuznetsov A.E., Sokolova V.M. Osnovnye faktory, vliyayushchie na prochnost' izdelii pri pechati na 3D-printere [The main factors affecting the strength of products when printing on a 3D printer]. *Sbornik materialov V vserossiiskoi konferentsii «Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya: dostizheniya i perspektivy»* [Proceedings of the V All-Russian Conference «Chemistry and chemical technology: achievements and prospects»]. Kemerovo, 2020, pp. 118.1–118.5.

Информация об авторах

Осипов Дмитрий Валерьевич, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: osipovdnor@mail.ru.

Иванов Павел Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

Ковшин Андрей Сергеевич, инженер стартап-школы «Цифра», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: andrik893@mail.ru.

Пахомов Вадим Викторович, кафедра электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: vadim.pakhomov.2000@mail.ru.

Information about the authors

Dmitrii V. Osipov, Ph.D. Student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: osipovdnor@mail.ru.

Pavel Yu. Ivanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

Andrei S. Kovshin, engineer of the startup school «Digit», Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: andrik893@mail.ru.

Vadim V. Pakhomov, Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: vadim.pakhomov.2000@mail.ru.

Увеличение пропускной и провозной способностей инфраструктуры Восточного полигона за счет применения инновационного подвижного состава при транспортировке угольных грузов маршрутами

В.А. Оленцевич✉, Н.В. Власова

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

✉olencevich_va@mail.ru

Резюме

В представленном научном исследовании авторы попытались отразить перспективы и проблемы функционирования инфраструктурного комплекса Восточного полигона железных дорог в современных экономических и политических условиях развития транспортного сектора России, а именно с учетом полного разворота транспортных потоков на восточное направление, постоянного воздействия санкционной политики, регулярных внешнеторговых ограничений и др. Транспортные предприятия Восточного полигона вынуждены разрабатывать инновационные подходы с целью наращивания пропускной способности участков и железнодорожных станций, менять транспортную логистику, расширять сектор оказываемых услуг и сервисов для клиентов. Анализ объемных показателей работы за последний год показал, что в направлении Дальнего Востока параметры транспортировки экспортных грузов превысили 120 млн т в год при критической загрузке инфраструктурного комплекса Восточного полигона. К 2030 г. прогнозные значения экспорта только угольной продукции преимущественно в страны Азиатско-Тихоокеанского региона составят более 250 млн т. С учетом ограниченного ресурса пропускной способности Восточного полигона железных дорог такое перераспределение грузопотоков создаст сложную поездную ситуацию и потребует скорейшего разрешения данного вопроса. Проведенные исследования позволили выделить следующие возможные методы повышения эффективности пропуска поездов на наиболее загруженных направлениях: применение инновационного вагонного парка повышенной грузоподъемности; увеличение длины состава; оптимизация движения порожних вагонопотоков. С целью увеличения пропускной и провозной способностей инфраструктуры Восточного полигона железных дорог рассмотрено предложение по применению инновационных полувагонов при транспортировке угольных грузов маршрутами. Объективным критерием использования для транспортировки угольных грузов на восточном направлении именно инновационного подвижного состава является его экономическая эффективность для всех участников перевозочного процесса.

Ключевые слова

Восточный полигон железных дорог, пропускная и провозная способности, инфраструктурный комплекс, организация движения поездов, методы системного анализа, грузоподъемность, инновационный подвижной состав, угольный маршрут

Для цитирования

Оленцевич В.А. Увеличение пропускной и провозной способностей инфраструктуры Восточного полигона за счет применения инновационного подвижного состава при транспортировке угольных грузов маршрутами / В.А. Оленцевич, Н.В. Власова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 173–182. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).173-182.

Информация о статье

поступила в редакцию: 17.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 24.12.2022 г.; принята к публикации: 26.12.2022 г.

Increasing the throughput and carrying capacity of the Eastern Poligon infrastructure by using innovative rolling stock in the transportation of coal cargo by routes

V.A. Olentsevich✉, N.V. Vlasova

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉olencevich_va@mail.ru

Abstract

In the presented scientific study, the authors tried to reflect the prospects and problems of the functioning of the Eastern Polygon of Railways infrastructure complex under the modern economic and political conditions of Russia's transport sector development: taking into account the complete reversal of traffic flows to the eastern direction, the constant impact of sanctions policy, regular foreign trade restrictions, etc. The transport enterprises of the Eastern Polygon are forced to develop innovative approaches in order to increase the capacity of sections and railway stations, change transport logistics, expand the range of service provided for customers. An analysis of the volume indicators of work over the past year showed that in the direction of the Far East,

the parameters of transportation of export goods exceeded 120 million tons per year with a critical load of the infrastructure complex of the Eastern Polygon. By 2030, the projected export values of coal products alone will amount to more than 250 million tons, mainly to the countries of the Asia-Pacific region. Taking into account the limited capacity resource of the Eastern Polygon of Railways, such a redistribution of cargo flows will create a difficult train situation and will require a speedy resolution of this issue. The conducted research allowed to highlight the possible methods of improving the efficiency of passing trains in the busiest directions such as: the use of an innovative wagon park with increased load capacity, increasing the length of the train, optimizing the movement of empty wagon traffic. In order to increase the carrying and throughput capacity of the infrastructure of the Eastern Railway Polygon, a proposal was considered for the use of innovative gondola wagons for the transportation of coal cargo by routes. The objective criterion for the use of innovative rolling stock to transport coal cargoes in the eastern direction is its economic efficiency for all participants in the transportation process.

Keywords

The Eastern polygon of railways, throughput and carrying capacity, infrastructure complex, organization of train traffic, methods of system analysis, load capacity, innovative rolling stock, coal route

For citation

Olenkevich V.A., Vlasova N.V. Uvelichenie propusknoi i provoznoi sposobnosti infrastruktury Vostochnogo poligona za schet primeneniya innovatsionnogo podvizhnogo sostava pri transportirovke ugol'nykh грузов маршрутами [Increasing the throughput and carrying capacity of the Eastern Polygon infrastructure by using innovative rolling stock in the transportation of coal cargo by routes]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 173–182. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).173-182.

Article info

Received: October 17, 2022; Revised: December 24, 2022; Accepted: December 26, 2022.

Введение

В условиях разворота транспортных потоков на восточное направление, санкционной политики и внешнеторговых ограничений транспортные предприятия вынуждены разрабатывать инновационные подходы с целью прироста пропускной способности участков и железнодорожных станций. Максимальная подготовка к перспективным нагрузкам данного транспортного направления и инфраструктурного комплекса – основная задача, стоящая перед руководством ОАО «Российские железные дороги» («РЖД»). С этой целью необходимо разработать комплекс мероприятий, качественная реализация которых позволит увеличить пропускную и провозную способности инфраструктуры Восточного полигона железных дорог при условии наращивания провозных мощностей на 30 % [1–3].

Анализ объемных показателей работы железных дорог за 2021 г. показал, что в направлении Дальнего Востока параметры транспортировки экспортных грузов превысили 120 млн т в год. Данные объемы произведены в условиях близкой к критической загрузке инфраструктурного комплекса железнодорожных участков и направлений Восточного полигона. Коэффициент загрузки более 50 % инфраструктуры составил 96,8 %. При этом необходимо отметить, что наибольшая загрузка наблюда-

лась на следующих элементах инфраструктурного комплекса:

– западный участок Байкало-Амурской магистрали – Северомуйский тоннель, железнодорожный участок от Таксимо до станции Тында;

– участок Тайшет – Петровский завод Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД);

– горно-перевальные участки Большой Луг – Слюдянка-1 и Чернышевск – Хабаровск.

Большое влияние оказал и тот факт, что на загрузку восточного направления влияет большой объем пассажирского сообщения, которое является приворотным [4–7].

В 2021 г. проблема с Восточным полигоном вышла на федеральный уровень, с целью улучшения состояния перевозочного процесса, организации бесперебойности и безопасности работы структурных подразделений отрасли обновляется инфраструктура ОАО «РЖД», разрабатываются и реализуются проектные решения по модернизации и реконструкции участков большинства важнейших железнодорожных линий.

Многие известные ученые мира работают над проблемой повышения эффективности использования имеющейся транспортной инфраструктуры железных дорог, занимаются разработкой и применением инновационных технологий и технических средств, позволяющих

обеспечить увеличение уровня пропускной и провозной способностей. В качестве решения предлагаются системы интервального регулирования движения поездов, направленные на уменьшение межпоездного интервала. В то же время ведется большая работа по увеличению основополагающих характеристик грузового поезда, которыми являются скорость и масса. Среди возможных методов повышения эффективности пропуска поездов, по мнению авторов, сегодня целесообразно рассматривать: применение инновационного вагонного парка повышенной грузоподъемности, увеличение длины состава, оптимизацию движения порожних вагонопотоков.

Анализ интенсивности отправок угольной продукции на восточном направлении

В задачи инфраструктурного комплекса Восточного полигона железных дорог входит бесперебойное функционирование основных трансъевразийских транспортных коридоров, для чего предприятиями полигона обеспечивается эффективная организация следующих грузопотоков:

- транспортировка в сторону портов Дальнего Востока и далее морскими путями к возрастающим рынкам сбыта Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) грузов западных областей России и добывающих компасов Урала и Сибири;

- транспортировка к крупным промышленным районам и морским портам Китая грузов через железнодорожные переходы Дальнего Востока, с использованием южного сектора Транссибирской магистрали и железнодорожной станции Забайкальск;

- маршруты через Монголию [8, 10].

Необходимо учитывать тот факт, что данное железнодорожное направление обеспечивает высокий объем пассажирского сообщения между обширными территориями Российской Федерации.

За три последних года транспортные потоки в направлении портов Дальнего Востока имеют существенный прирост – 42,5 млн т, что обеспечивает более 40 % суммарного грузооборота портов нашей страны. Наибольшую долю суммарного транспортного потока Восточного полигона составляют экспортные и внутриросийские грузы, к которым в первую очередь относится уголь и нефтепродукты, большими тем-

пами растут контейнерные перевозки. При этом экспортные отправки угольных грузов в направлении стран АТР составляют свыше 70 % загрузки Байкало-Амурской магистрали и Транссиба, объем загрузки в восточном направлении увеличился в 1,5 раза. Так, в 2020 г. 87,5 % экспортного угля отправлено именно через порты Дальнего Востока. Прирост экспортных грузов и грузов, проходящих через сухопутные пограничные переходы с Китаем, вырос в 3,5 раза по сравнению с 2017 г. и достиг 12,7 млн т к 2022 г. Анализ показывает, что угольные маршруты загружают железные дороги Восточного полигона два раза: при следовании в груженом состоянии на экспортное направление и при возврате порожнего подвижного состава, возврат которого возможен без осуществления дополнительных операций по зачистке [3–7].

Приоритетным направлением погрузки угольной продукции в 2022 г. стали порты Дальнего Востока, что составляет около 50 % от общей погрузки угля на сети дорог ОАО «РЖД» [3, 5, 7–10] (рис. 1).



Рис. 1. Приоритетные направления погрузки угольной продукции

Fig. 1. Priority loading directions for coal products

В 2021 г. в адрес портов Дальнего Востока было отправлено свыше 180 млн т угольных грузов, что на 10,2 % выше аналогичного периода предыдущего года. Только в ноябре 2021 г. отгрузка в адрес морских терминалов выросла на 3,1 % к ноябрю 2020 г. Отгрузка угля в порты Дальневосточного бассейна сократилась на 1,3 % в ноябре 2021 г. относительно того же периода предыдущего года. Динамика погрузки угольных грузов в порты представлена на рис. 2. Данные о погрузке представлены с учетом отправок в иностранные порты, что вызывает отклонение от отчетности ОАО «РЖД», в которой учтена только погрузка в российские порты и не в полной мере отражается падение погруз-

ки в направлении Балтийского бассейна [5, 7–11]. На рис. 3 представлены основные морские порты перевалки угольной продукции по данным 2022 г. [10, 11].

Наша страна всегда была и остается крупнейшим экспортером угольной продукции, поскольку с 2020 г. объем экспорта превышает объем поставок данного рода груза во внутреннем сообщении. Начиная с 2017 г. впервые в новейшей истории разработка российских углей ежегодно превышает 400 млн т, согласно прогнозам экспертов, это не является максимальным объемом добычи. К концу 2030 г., по данным стратегии развития угольной промышленности страны, существует потребность при-

роста объемов добычи до 600 млн т, с готовностью при положительном развитии сырьевого рынка наращивания данных параметров до 650 млн т в год [7, 10, 11].

Несмотря на положительную тенденцию, санкционная политика оказала существенное влияние на угольную промышленность страны, понижение уровня спроса на данную продукцию вызвало падение ее стоимости на европейском рынке, при этом выросли транспортные расходы. Например, в 2021 г. расходы на транспортировку продукции Кузбасса составили около 65 % от стоимости готовой продукции. Поставки для компаний можно оценить, как «убыточные». В создавшихся рыночных условиях часть произ-

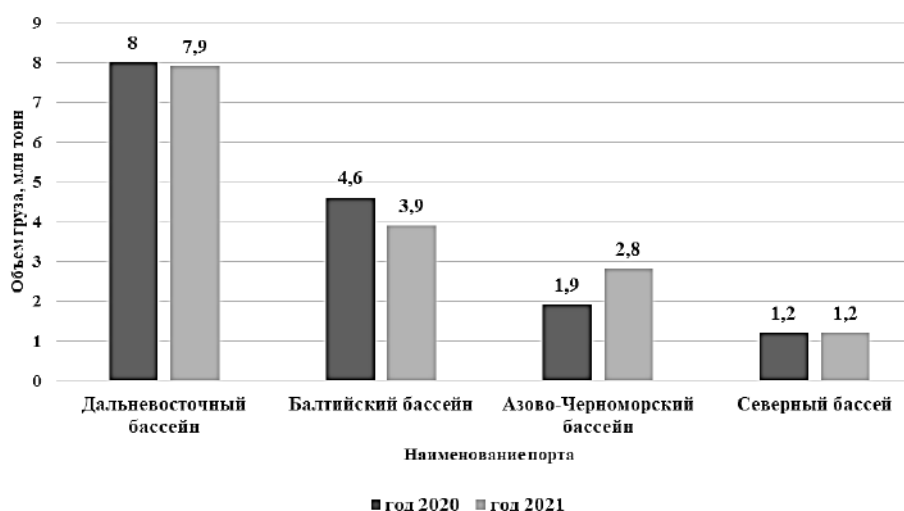


Рис. 2. Интенсивность отгрузки угольной продукции в морские порты, млн т
Fig. 2. Coal products shipment intensity to seaports, mln t

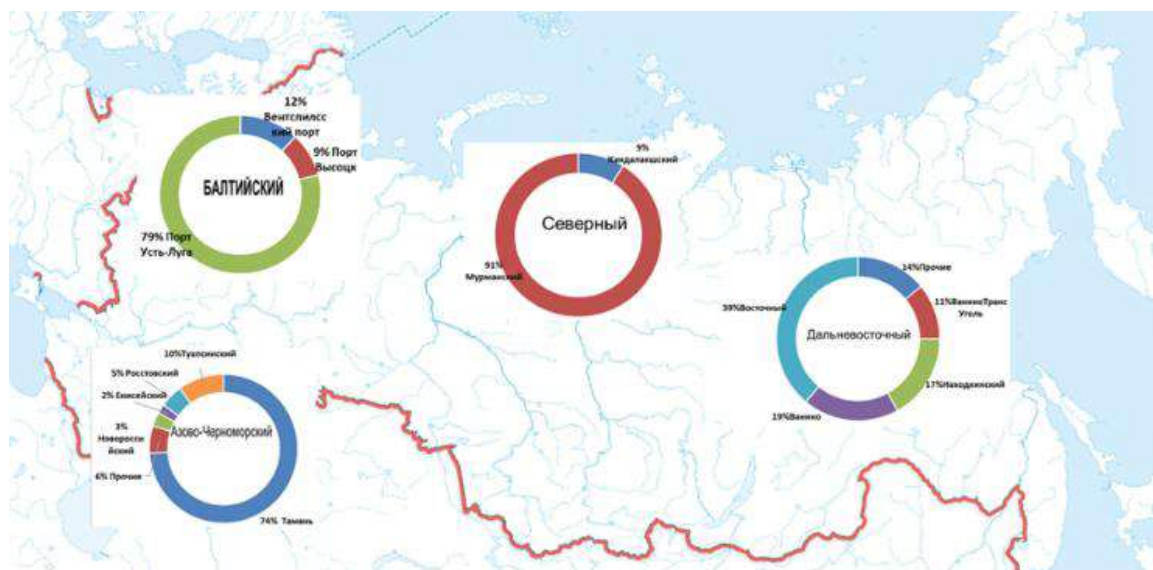


Рис. 3. Основные морские порты перевалки угля
Fig. 3. Main seaports for transshipment of coal

водств сократили плановую добычу. Другая часть обратилась в транспортную отрасль с просьбой о понижении уровня тарифной ставки на поставку угольной продукции для того, чтобы окупились собственные издержки, и получили поддержку ОАО «РЖД».

Анализ сложившейся политической и экономической ситуации при дальнейшем эффективном развитии российской угольной промышленности требует разработки новых подходов и переработки основных пунктов стратегии с учетом самых неблагоприятных подходов и полного отказа европейских сырьевых рынков от российского топлива. Данные факторы потребуют от отрасли поиска новых потребителей для сбыта своей продукции (скорее всего в странах АТР) [2, 4, 10].

Для решения поставленных задач уже разработаны и реализуются проекты по наращиванию объемов добычи угля в Республиках Саха и Хакасии, Красноярском крае, а также на месторождениях Амурской области. Все проекты имеют ориентир на транспортировку через порты Дальневосточного бассейна.

Данный вариант развития событий с транспортировкой угольной продукции был предусмотрен логистами ОАО «РЖД», к 2030 г. прогнозные значения экспорта составили 250 млн т, также был составлен прогноз развития восточного направления транспортировки данной категории грузов преимущественно в страны АТР: Япония, Китай, Индия, Индонезия. С учетом ограниченного ресурса пропускной способности Восточного полигона железных дорог такое перераспределение грузопотоков создаст сложную поездную ситуацию и потребует скорейшего разрешения данного вопроса. Проектные решения по созданию новой инфраструктуры и дальнейшему развитию имеющихся станций и линий являются достаточно затратными и не позволят решить проблему в кратчайшие сроки, в связи с чем необходим поиск новых технологических подходов в организации вагонопотоков [5, 10–13].

Применение инновационного подвижного состава при транспортировке угольных грузов маршрутами

В условиях постоянно увеличивающегося грузооборота, когда пропускная способность большинства участков используется полностью, из всех показателей, характеризующих

эксплуатационную работу железных дорог Восточного полигона, максимальное системное влияние на эффективную организацию перевозочного процесса имеющейся инфраструктуры оказывают два: вес грузового поезда и скорость движения поездов на рассматриваемом участке. Данные показатели не являются константами и представляют собой основные достаточно значимые для производства заданного объема перевозок параметры регулирования режима функционирования участка, а также служат показателями качества транспортных услуг для пользователей.

При этом обратно пропорциональная зависимость установлена между максимальным весом грузового поезда и скоростью движения, так увеличение значения одного из указанных показателей приводит к уменьшению другого, следовательно, одновременное улучшение их размеров возможно, но только при наличии резерва технического оснащения объектов инфраструктурного комплекса железных дорог или при условии его усиления за счет капитальных вложений в развитие транспортной инфраструктуры.

В данных условиях одним из приоритетных направлений развития железнодорожного транспорта является рациональное повышение веса поездов. Вождение сверхтяжеловесных поездов, как и формирование составов повышенной длины и массы, увеличение весовых норм на целых направлениях, ликвидация неполновесных и неполносоставных поездов, повышение статической нагрузки вагона, сдваивание порожних составов, прицепка к каждому поезду одного-двух дополнительных вагонов – все это направлено на достижение одной цели: меньшим числом поездов перевезти больше грузов.

В настоящее время широкое распространение получило производство и использование инновационного подвижного состава, разработку которого активно ведет Уральское конструкторское бюро вагоностроения. По мнению авторов, для транспортировки угольной продукции в рамках продвижения по Восточному полигону с целью повышения пропускной и провозной способностей данного направления целесообразно применение именно инновационных полувагонов модели 12-196-02 грузоподъемностью 75 т и объемом кузова 94 м³. Согласно конструктивным особенностям, кузов данного вагона оптимально установить на те-

лежке модели 18-194-1 с повышенной осевой нагрузкой – до 25 тс против имеющихся у применяемых конструкций полувагонов 23,5 тс. Новая технология производства подвижного состава предусматривает увеличение его срока службы на десять лет, который, согласно техническому решению, составляет 32 года. Увеличен пробег тележки 18-194-1 до срока наступления первого планового ремонта – 500 тыс. км. Инновационный полувагон может выгружаться с применением всех имеющихся видов вагоноопрокидывателей, а также позволяет сократить техническое воздействие на верхнее строение железнодорожного пути, что неоднократно подтверждено на различных полигонах научными и испытательными центрами. Новая модель с более вместительным и прочным кузовом занимает сегодня центральное место в продуктовой линейке инновационных изделий завода изготовителя (рис. 4).



Рис. 4. Модель инновационного полувагона 12-196-02 грузоподъемностью 75 т

Fig. 4. Model of the innovative gondola wagon 12-196-02 with a carrying capacity of 75 tons

Согласно итогам проведенных исследований по повышению веса грузовых поездов до 9 000 т с увеличением его длины до 100 условных вагонов, были определены основные векторы по оптимизации конструктивных особенностей подвижного состава, режимов управления и вождения грузовых поездов, а также требования к развитию железнодорожной инфраструктуры, что позволило за последние 15 лет увеличить среднюю массу поезда. Однако при увеличении массы поезда возникают ограничения, накладываемые силой тяги локомотива и полезной длиной приемоотправочных путей железнодорожных станций. Кроме того, было зафиксировано появление значительных инфраструктурных ограничений для движения поездов повышенной массы (от 7 100 до 9 000 т), в том числе при осевой нагрузке на ось 23,5 тс и более [6–8].

Объективным критерием применения инновационного полувагона для транспортировки угольных грузов на восточном направлении является экономическая эффективность данного вагона для всех участников перевозки грузов: грузоотправителя, перевозчика, владельца инфраструктуры и собственника подвижного состава, что подтверждается его практической эксплуатацией операторами подвижного состава западного региона железных дорог Российской Федерации [2, 12–14].

На сегодняшний день доля инновационных полувагонов на сети ОАО «РЖД» составляет 26 % или 153,500 тыс. вагонов (рис. 5).

Детальное раскрытие применяемой технологии рассмотрено на примере работы участка Иркутск-Сортировочный – Тайшет ВСЖД.

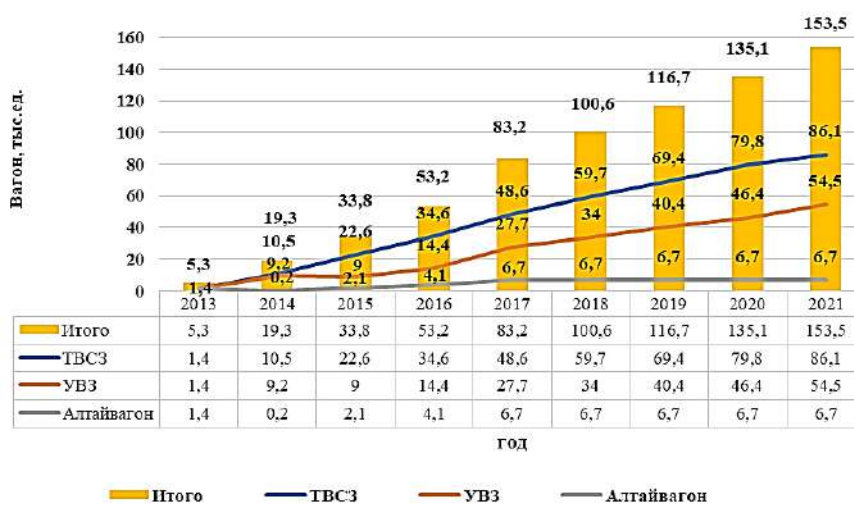


Рис. 5. Динамика производства инновационного парка полувагонов, тыс. ед. (нарастающим итогом)

Fig. 5. Dynamics of production of gondola wagons innovative park, thousand units (cumulative)

Согласно проведенным расчетам с использованием методов системного анализа, получено значение количества высвободившихся вагонов за счет применения инновационного подвижного состава для перевозки угольных грузов на Восточном полигоне, которое составило 141 вагон на 1 000 ед. погрузки в сутки, прирост пропускной способности участка железнодорожной линии – 2 нитки графика движения поездов, перерабатывающей – 3,89 млн т груза в год [15–17].

Для более детального анализа показателей работы участка произведен расчет значения наличной и потребной пропускных способностей.

1. Нечетное направление: наличная пропускная способность – 126 поездов в сутки, потребная – 118 поездов.

2. Четное направление: наличная пропускная способность – 126 поездов в сутки, потребная – 123 поезда.

По результатам расчетов значений пропуск-

ных способностей наиболее насыщенного для движения участка Восточного полигона следует, что потребная пропускная способность меньше наличной, т.е. участок способен справиться с заданными размерами движения поездов.

Прогнозные значения величины доходов и экономического эффекта ОАО «РЖД» от увеличения пропускной и провозной способностей инфраструктуры Восточного полигона за счет применения инновационного подвижного состава при транспортировке угольных грузов маршрутами возможно отразить путем сопоставления значений себестоимости 10 т·км по вариантам графика движения поездов на рассматриваемом участке.

Увеличение пропускной способности рассматриваемого участка приведет к изменению экономических показателей: себестоимость 10 т·км в грузовом движении, годовые эксплуатационные расходы, доходы и прибыль ОАО «РЖД».

Расчет себестоимости по вариантам графика движения поездов
Calculation of the cost price according to the variants of the train schedule

Измеритель Meter	Расходная ставка, руб. Expenditure rate, rub (e_i)	Величина измерителя (i) Meter value		Расходы по измерителю, руб. Expenses for the meter, rub.	
		ГДП(0)	ГДП(1)	ГДП(0)	ГДП(1)
Вагоно-километр Wagon-kilometer	0,17	23,22	23,08	3,94	3,92
Вагоно-час Wagon-hour	14,27	0,65	0,62	9,27	8,84
Локомотиво-километр Locomotive-kilometer	51,23	0,36	0,34	18,90	17,46
Локомотиво-час Locomotive-hour	508,45	0,013	0,01	6,61	5,59
Бригадо-час локомотивных бригад Crew-hour of locomotive crews	1 579,12	0,015	0,012	23,68	18,95
Тонно-километр брутто Gross ton-kilometer	0,0084	1 626,9	1 825,2	13,66	15,33
Расход электроэнергии Electricity consumption	3,04	1,2	1,3	0,037	0,03
Локомотиво-час маневровой работы Locomotive-hour of shunting work	1 254,36	0,012	0,01	15,05	15,05
Грузовая отправка Freight shipment	412,78	0,024	0,022	9,91	9,08
$\mathcal{E}_{\text{зав}}$	–	–	–	101,09	94,75
$\mathcal{E}_{\text{ус-пос}}$	–	–	–	40,44	40,44
$\mathcal{E}_{\text{общ}}$	–	–	–	141,53	135,19
$C_{10\text{ткм}}$	–	–	–	1,42	1,35

Примечание: ГДП – график движения поездов.

Note: TTS - train schedule.

В таблице с использованием метода расходных ставок произведен расчет величин измерителей и расходов по каждому измерителю при изменении технологии организации движения поездов.

Из таблицы видно, что значение себестоимости работ по участку в условиях внедрения инновационного подвижного состава снизилось на 0,07 руб./10 т·км, т. е. улучшилось.

Таким образом, годовой грузооборот составил 32 174,604 млн т·км в год при существующем графике движения поездов и 50 900,564 млн т·км в год при новой технологии.

Годовые эксплуатационные расходы участка железнодорожной линии при существующем графике движения поездов – 4 568,794 млн руб./год, при новой технологии – 6 871,576 млн руб./год. Увеличение значения годовых эксплуатационных расходов при росте объемов работы на участке составит 2 302,782 млн руб./год.

Проведенный расчет показал: несмотря на сокращение себестоимости работ на участке на 0,07 руб./10 т·км, происходит увеличение эксплуатационных расходов на 2 302,782 млн руб./год, причина чего – прирост грузооборота на 18 725,924 млн т·км в год, вызванный увеличением пропускной способности до 147 грузовых поездов в сутки [18, 19].

Прирост доходов за счет увеличения объема грузооборота составит 32 468,223 млн руб./год. Экономический эффект ОАО «РЖД» – 30 166,445 млн руб./год. Расчеты показали, что, несмотря на увеличение эксплуатационных расходов на участке при внедрении новой технологии, размер получаемого дохода будет значительно выше и позволит получить значительный экономический эффект [18, 19].

Заключение

Растущий спрос на угольную продукцию, развитие контейнерных маршрутов, а также масштабные планы российских компаний создали предпосылки для увеличения провозной способности железных дорог Восточного полигона, из-за чего возникают сложные технические и организационные условия его функционирования. Регулярный прирост грузопотока последних пяти лет осложняет работу всего инфраструктурного комплекса возникновением дефицита его мощностей, ликвидация которого возможна сегодня только путем проведения комплекса мероприятий.

Последующая оптимальная организация движения грузовых поездов в рамках функционирования железных дорог Восточного полигона путем применения большегрузного движения возможна с учетом повышения веса грузового поезда в первую очередь по средствам прироста осевых и погонных нагрузок. В данном случае грузовые поезда, состоящие из инновационных вагонов, будут классифицироваться как тяжеловесные, масса которых для соответствующих серий локомотивов на 100 т и более будет превышать установленную графиком движения весовую норму на участке следования данного поезда, что требует особых условий работы системы энергоснабжения [20, 21].

Дополнительный доход компании ОАО «РЖД» от увеличения пропускной и провозной способностей инфраструктуры Восточного полигона за счет применения инновационного подвижного состава при транспортировке угольных грузов маршрутами составит 162,5 млн руб. в год.

Список литературы

1. Стратегия развития Холдинга «РЖД» на период до 2030 года // ОАО «РЖД» : сайт. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=804> (Дата обращения 10.10.2022).
2. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : сайт. URL: <http://www.rzd.ru> (Дата обращения: 7.10.2022).
3. Оленевич В.А., Власова Н.В. Оптимизация работы железнодорожных станций Восточного полигона в условиях внедрения современных систем организации движения поездов // Управление эксплуатационной работой на транспорте: сборник трудов Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 103–108.
4. Об утверждении Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.09.2018 г. № 2101-р. URL: <http://government.ru/docs/34297/> (Дата обращения: 12.10.2022).
5. Баженов Ю., Денежкин А. Восточный полигон РЖД как пример региональной интеграции на Дальнем востоке // Постсоветский материк. 2019. №1(21). С. 53–63.
6. Восточный полигон: новые возможности или старые ограничения? // Морские вести России : сайт. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1687/86211/> (Дата обращения: 2.10.2022).
7. РЖД хочет перевозить больше угля и меньше «недружественных» контейнеров // Тэкноблог : сайт. URL: <https://teknoblog.ru/2022/05/19/117338> (Дата обращения: 8.10.2022).

8. Динец Д.А., Меркулов А.С. Применение принципа управления транспортным коридором к организации деятельности Транссибирской магистрали // *Транспортное право и безопасность*. 2021. № 3 (39). С. 49–56.
9. Formation of new principles and models of operation of structural units of the industry under the conditions of implementation of digital technologies / D.A. Lysenko, V.A. Olentsevich, N.V. Vlasova et al. // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 1064 (2021). 012025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012025>.
10. Организационно-экономическая модель управления инновационным потенциалом Иркутской области / В.Н. Гордеев, В.Ю. Конюхов, К.И. Новикова и др. Иркутск: ИрННТУ, 2014. 91 с.
11. Курганов В.М. Эффективность логистики и конкурентоспособность России // *Транспорт Рос. Федерации*. 2013. № 1 (44). С. 19–23.
12. Файзрахманова Е.В., Оленцевич А.А., Микаилов Р.А. Совершенствование управления логистическими издержками предприятия // *Актуальные вопросы современной экономики*. 2021. № 1. С. 70–74.
12. Каимов Е.В. Риск-ориентированный подход при оценке технического состояния фундаментов мостовых сооружений // *Мир транспорта*. 2020. Т. 18. № 6 (91). С. 64–73.
13. Перфильева П.В., Кашкарев А.С., Власова Н.В. Инновационные подходы к совершенствованию качества предоставления услуг клиентам железнодорожного транспорта // *Современные инновации в науке и технике : сб. науч. ст. 12-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием*. Курск, 2022. С. 193–196.
14. Оленцевич В.А., Гозбенко В.Е. Методическое и программное обеспечение прогнозирования значений уровня безопасности функционирования железнодорожной транспортной системы. Иркутск : ИрГУПС, 2019. 172 с.
15. Базилевский М.П., Носков С.И. Алгоритм формирования множества регрессионных моделей с помощью преобразования зависимой переменной // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2011. № 3. С. 159–160.
16. Супрун В.Н., Лакин И.К. Системный анализ показателей работы железных дорог как исходных данных систем менеджмента качества. Красноярск : Гротеск, 2005. 52 с.
17. Терешина Н.П., Тонг Хонг Фи. Факторы, влияющие на формирование конкурентных преимуществ в сфере транспорта // *Транспортное дело России*. 2021. № 5. С. 64–66.
18. Об утверждении методики оценки экономической эффективности проектов бережливого производства в ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» № 1357/р от 29.06.2020 г.
19. Паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)»: распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.04.2021 г. № 1100-р.
20. Составы идут на сближение // *Гудок*. 2021. № 89 : электрон. газета. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1565572> (Дата обращения: 15.10.2022).

References

1. Strategiya razvitiya Kholdinga «RZHD» na period do 2030 goda (Elektronnyi resurs) [Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030 (Electronic resource)]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=804> (Accessed October 10, 2022).
2. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed October 7, 2022).
3. Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Optimizatsiya raboty zheleznodorozhnykh stantsii Vostochnogo poligona v usloviyakh vnedreniya sovremennykh sistem organizatsii dvizheniya poezdov [Optimization of the work of the railway stations of the Eastern polygon in the conditions of the introduction of modern systems for the organization of train traffic]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Upravlenie ekspluatatsionnoi rabotoi na transporte»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Management of operational work on transport»]. Saint Petersburg, 2022, pp. 103–108.
4. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 30.09.2018 g. № 2101-r, «Ob utverzhdenii Kompleksnogo plana modernizatsii i rasshireniya magistral'noy infrastruktury na period do 2024 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation no 2101-r dated September 30, 2018 «On approval of the Comprehensive Plan for Modernization and Expansion of the trunk infrastructure for the period up to 2024»]. Available at: URL: <http://government.ru/docs/34297/> (Accessed October 12, 2022).
5. Bazhenov Yu., Denezhkin A. Vostochnyi poligon RZhD kak primer regional'noi integratsii na Dal'nem vostoke [The Eastern polygon of Russian Railways as an example of regional integration in the Far East]. *Postsovet'skii materik* [Post-Soviet continent], 2019, no. 1 (21), pp. 53–63.
6. Vostochnyi poligon: novye vozmozhnosti ili starye ogranicheniya? (Elektronnyi resurs) [The Eastern polygon: new opportunities or old limitations? (Electronic resource)]. Available at: <http://www.morvesti.ru/analitika/1687/86211/> (Accessed October 2, 2022).
7. RZhD khochet perevozit' bol'she uglya i men'she «nedruzhestvennykh» konteynerov (Elektronnyi resurs) [Russian Railways wants to transport more coal and fewer «unfriendly» containers (Electronic resource)] <https://teknoblog.ru/2022/05/19/117338> (Accessed October 8, 2022).
8. Dinets D.A., Merkulov A.S. Primenenie printsipa upravleniya transportnym koridorom k organizatsii deyatelnosti Transsibirskoi magistrali [Application of the principle of transport corridor management to the organization of the Trans-Siberian Railway]. *Transportnoe pravo i bezopasnost'* [Transport Law and security], 2021, no. 3 (39), pp. 49–56.
9. Lysenko D.A., Olentsevich V.A., Vlasova N.V., Konyukhov V.Yu. Formation of new principles and models of operation of structural units of the industry under the conditions of implementation of digital technologies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 1064 (2021), 012025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012025>.

10. 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.
11. Kurganov V.M. Effektivnost' logistiki i konkurentosposobnost' Rossii [Logistics efficiency and competitiveness of Russia]. *Transport Rossiiskoi Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2013, no. 1 (44), pp. 19–23.
12. Faizrakhmanova E.V., Olentsevich A.A., Mikailov R.A. Sovershenstvovanie upravleniya logisticheskimi izderzhkami predpriyatiya [Improving the management of logistics costs of the enterprise]. *Aktual'nye voprosy sovremennoi ekonomiki* [Topical issues of the modern economy], 2021, no. 1, pp. 70–74.
13. Kaimov E.V. Risk-orientirovannyi podkhod pri otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya fundamentov mostovykh sooruzhenii [Risk-based approach in assessing the technical condition of foundations of bridge structures]. *Mir transporta* [World of transport], 2020, vol. 18, no. 6 (91), pp. 64–73.
14. Perfil'eva P.V., Kashkarev A.S., Vlasova N.V. Innovatsionnye podkhody k sovershenstvovaniyu kachestva predstavleniya uslug klientam zheleznodorozhnogo transporta [Innovative approaches to improving the quality of providing services to railway transport customers]. *Sbornik nauchnykh statei XII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike»* [Proceedings of the Twelfth All-Russian Scientific and Technical Conference with International participation «Modern innovations in science and technology»]. Kursk, 2022, pp. 193–196.
15. Olentsevich V.A., Gozbenko V.E. Metodicheskoe i programmnoe obespechenie prognozirovaniya znachenii urovnya bezopasnosti funktsionirovaniya zheleznodorozhnoi transportnoi sistemy [Methodological and software support for predicting the values of the level of safety of the functioning of the railway transport system]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2019. 172 p.
16. Bazilevskii M.P., Noskov S.I. Algoritm formirovaniya mnozhestva regressiionnykh modelei s pomoshch'yu preobrazovaniya zavisimoi peremennoi [Algorithm for forming a set of regression models using transformation of a dependent variable]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2011, no. 3, pp. 159–160.
17. Suprun V.N., Lakin I.K. Sistemnyi analiz pokazatelei raboty zheleznykh dorog kak iskhodnykh dannykh sistem menedzhmenta kachestva [System analysis of railway performance indicators as source data of quality management systems]. Krasnoyarsk: Grotesk Publ., 2005. 52 p.
18. Tereshina N.P., Tong Hong Phi. Faktory, vliyayushchie na formirovanie konkurentnykh preimushchestv v sfere transporta [Factors influencing the formation of competitive advantages in the field of transport]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia], 2021, no. 5, pp. 64–66.
19. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 1357/r ot 29.06.2020 g. «Ob utverzhdenii metodiki otsenki ekonomicheskoi effektivnosti proektov berezhlivogo proizvodstva v OAO «RZhD» [Order of JSC «Russian Railways» dated June 29, 2020 no 1357/r «On approval of the methodology for assessing the economic efficiency of lean production projects in JSC «Russian Railways»].
20. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 28.04.2021 g. no 1100-r «Pasport investitsionnogo proekta «Modernizatsiya zheleznodorozhnoi infrastruktury Baikalo-Amurskoi i Transsibirskoi zheleznodorozhnykh magistralei s razvitiem propusknykh i provoznykh sposobnostei (vtoroi etap)»:[Decree of the Government of the Russian Federation no 1100-r dated April 28, 2021 «Passport of the investment project «Modernization of the railway infrastructure of the Baikal-Amur and Trans-Siberian railways with the development of throughput and carrying capacity (second stage)»].
21. Sostavy idut na sblizhenie (Elektronnyi resurs) [The trains are moving closer (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1565572> (Accessed October 15, 2022).

Информация об авторах

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.

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

Information about the authors

Viktoria A. Olentsevich, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operational work management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olencevich_va@mail.ru.

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

Перспективы внедрения электровоза 2ЭС5К в эксплуатацию на полигоне Западно-Сибирской железной дороги

К.И. Доманов✉, В.А. Давыдов

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

✉dki35@ya.ru

Резюме

Железнодорожный транспорт является неоспоримым лидером в перевозочном процессе на территории России. В современных реалиях вопрос грузоперевозок стратегически важен, поэтому железнодорожная отрасль заинтересована в изменениях, которые будут способствовать адаптации и оперативному перестроению перевозочного процесса под влиянием сторонних факторов на международные транспортные коридоры, значительная часть которых пролегает по территории России. В данной статье рассмотрены параметры и профили железнодорожных участков Среднесибирского хода Западно-Сибирской железной дороги. Рассчитан удельный вес легких элементов пути с уклонами, находящимися в диапазоне от -3 до $+3$ ‰, для тяговых плеч, имеющих лимитирующие уклоны на данном полигоне железных дорог. В работе указаны причины, которые обосновывают необходимость обновления корпоративного парка электровозов на исследуемых участках. Приведен сравнительный анализ технических характеристик и межремонтных периодов магистральных грузовых электровозов серии ЭС5К и двухсекционных электровозов ВЛ80С. Представлены результаты тяговых расчетов для определения требуемых тяговых единиц для заданного тягового плеча, на которых предполагается внедрить в эксплуатацию магистральный грузовой электровоз серии ЭС5К, с учетом подталкивающих локомотивов. По результатам расчета потребного парка локомотивов на рассматриваемом железнодорожном участке выявлено, что новых электровозов 2ЭС5К требуется на 29 ед. меньше в сравнении с электровозами ВЛ80С. Сделаны выводы о перспективах дальнейшего исследования потенциального использования в эксплуатации электровозов серии ЭС5К на участках Западно-Сибирской железной дороги электрифицированных на переменном токе.

Ключевые слова

электрическая тяга поезда, Среднесибирский ход, железнодорожный транспорт, обновление подвижного состава, электровоз 2ЭС5К, электровоз ВЛ80С, потребный парк локомотивов, лимитирующий уклон, технико-экономический расчет

Для цитирования

Доманов К.И. Перспективы внедрения электровоза 2ЭС5К в эксплуатацию на полигоне Западно-Сибирской железной дороги / К.И. Доманов, В.А. Давыдов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 183–191. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).183-191.

Информация о статье

поступила в редакцию: 7.11.2022 г.; поступила после рецензирования: 19.12.2022 г.; принята к публикации: 20.12.2022 г.

Prospects for commissioning of the 2ES5K electric locomotive at the West Siberian Railway Poligon

K.I. Domanov, V.A. Davydov

Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

✉dki35@ya.ru

Abstract

Railway transport is the undisputed leader in the transportation process in Russia. In modern realities, the issue of cargo transportation is strategically important, therefore, the railway industry is interested in changes that will contribute to the adaptation and operational restructuring of the transportation process under the influence of external factors on international transport corridors, a significant part of which runs through the territory of Russia. This article discusses the parameters and profiles of the railway sections of the Central Siberian course of the West Siberian Railway. The specific weight of light track elements with slopes in the range from -3 to $+3$ ‰ for traction arms with limiting slopes of the railway polygon under consideration is calculated. The paper presents the reasons that justify the need to update the corporate fleet of electric locomotives in the areas under consideration. The article presents a comparative analysis of the technical characteristics and overhaul periods of mainline freight electric locomotives of the ES5K series in comparison with the two-section electric locomotive VL80S. The results of traction calculations are presented to determine the required traction units for a given traction arm, on which it is supposed to put into operation the main freight electric locomotive of the ES5K series, taking into account pushing locomotives. The paper presents the results of calculating the required fleet of locomotives on the considered railway section. The calculation showed that new 2ES5K electric locomotives require 29 fewer locomotives compared to VL80S electric locomotives. Conclusions are drawn about the pro-

spects for further research on the potential use of electric locomotives of the ES5K series in operation on sections of the West Siberian Railway electrified on alternating current.

Keywords

train electric traction, Central Siberian course, railway transport, rolling stock renewal, electric locomotive 2ES5K, electric locomotive VL80S, required locomotive fleet, limiting slope, feasibility study

For citation

Domanov K.I., Davydov V.A. Perspektivy vnedreniya elektrovoza 2ES5K v ekspluatatsiyu na poligone Zapadnosibirskoi zheleznoi dorogi [Prospects for commissioning of the 2ES5K electric locomotive at the West Siberian Railway Polygon]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 183–191. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).183-191.

Article Info

Received: November 7, 2022; Revised: December 19, 2022; Accepted: December 20, 2022.

Введение

Перераспределение грузовых потоков в современных реалиях ставит перед локомотивным комплексом новые задачи, связанные с обеспечением тяговыми ресурсами для выполнения заявленного объема перевозочной работы [1–3]. Важной особенностью изменения условий организации перевозочного процесса и направлений следования грузопотоков стало образование крупных выгрузочных районов экспортных грузов в местах расположения морских портов на Северо-Западе и Юге Европейской части страны и на Дальнем Востоке [4–7]. Имеет место высокий уровень концентрации погрузки экспортных грузов на железных дорогах. В результате образовались загруженные направления большой протяженности, проходящие по нескольким железным дорогам. Железные дороги России включают в себя группу из восьми участков со значительными обменами грузопотоками, которые интегрированы в международные транспортные коридоры [8]:

- Южный регион;
- Регион Юг – Северо-Запад;
- Урало-Сибирский регион;
- Урало-Поволжский регион;
- Кузбасс – Дальний Восток;

- Кузбасс – Юг;
- Кузбасс – Центр;
- Кузбасс – Северо-Запад.

Анализируя транспортные коридоры и перемещаемую по ним продукцию, можно сделать вывод о важном стратегическом значении Кузбасского региона – ведущего угледобывающего центра России [9]. Железнодорожные пути, которые входят в состав транспортных коридоров, берущих свое начало в Кузбассе, пролегают через Урало-Сибирский и Восточный полигоны железных дорог. В частности, значительная протяженность пути пролегает по участкам Западно-Сибирской железной дороги. По ней осуществляются основные грузоперевозки зерна и продуктов его перемола, нефти и нефтепродуктов, железной и марганцевой руды, строительных грузов, кокса, черных металлов, каменного угля. Большая часть указанных грузов перевозится по железнодорожным путям Среднесибирского хода (рис. 1). Данная железнодорожная магистраль соединяет территории Кузбасса, Алтайского края, Новосибирскую и Омскую области. Среднесибирского ход – это угольная артерия России, по нему проходит основной поток угля в западную часть страны [10].

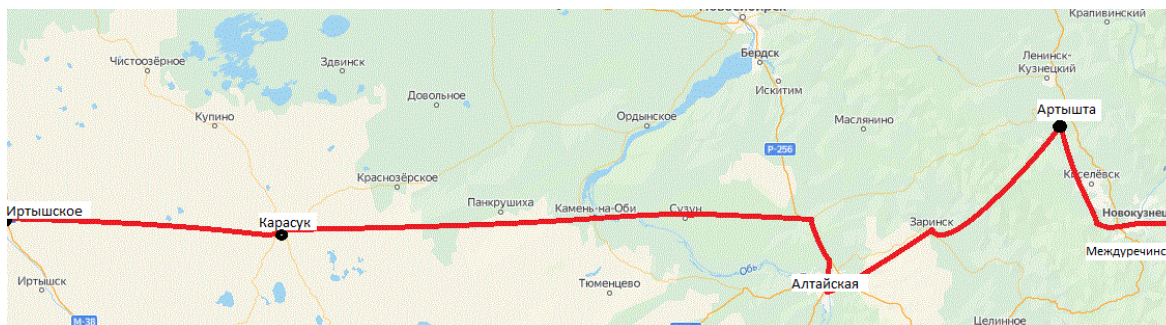


Рис. 1. Схема Среднесибирского хода
Fig. 1. The scheme of the Mid-Siberian course

Основной транспортируемой продукцией по Среднесибирскому ходу является каменный уголь [11]. До выхода поезда на «главный ход» (Транссибирская магистраль), состав проходит полигон Междуреченск – Входная. На этом полигоне участки Междуреченск – Артышта 2 длиной 159 км и Иртышское – Входная длиной 164 км электрифицированы на постоянном токе напряжением в контактной сети 3 000 В. На данном железнодорожном участке эксплуатируются электровозы серии ЭС10, ЭС6, ВЛ10 и ВЛ11. Участок Артышта 2 – Алтайская – Карасук – Иртышское длиной 872 км электрифицирован на однофазном переменном токе напряжением в контактной сети 25 000 В промышленной частоты 50 Гц. На этом участке эксплуатируются электровозы серий ВЛ80С и ВЛ80Т [12]. На полигоне Алтайская – Карасук – Иртышское, согласно [12–14], формируются, отправляются и принимаются поезда весом 14 200 т.

Рассматриваемые железнодорожные участки имеют холмисто-горный профиль и условно относятся к I и II типам. На рис. 2 и 3 приведены участки Среднесибирского хода, имеющие лимитирующие уклоны и равнинный профиль пути [15].

Профиль пути рассматриваемого участка относится ко II типу профиля.

Удельный вес легких элементов пути с уклонами в диапазоне от –3 до +3 ‰ составил:

$$k = 122,3/199,9 = 61,2 \text{ ‰}$$

На данном участке величина расчетного подъема составляет в четном направлении 9,4 ‰, в нечетном – 9,1 ‰.

Участок характеризуется легким (равнинным) профилем пути с уклоном до 4,2 ‰ и относится к I типу.

Удельный вес легких элементов пути с уклонами, находящимися в диапазоне от –3 до +3 ‰ составляет:

$$k = 163,7/163,8 = 99,9 \text{ ‰}$$

При организации и осуществлении перевозочного процесса на исследуемом полигоне актуальным является вопрос обеспечения бесперебойным и необходимым количеством тягового ресурса.

Эксплуатируемый парк

На участках Артышта 2 – Иртышское Среднесибирского хода Западно-Сибирской железной дороги используются в эксплуатации электровозы серии ВЛ80С 1980–1990 гг. выпуска. Средний возраст эксплуатируемых электровозов указанной серии – 37 лет. Согласно [16], предельный срок эксплуатации электровозов ВЛ80С составляет 30 лет. Таким образом, основная часть локомотивного парка Среднесибирского хода в скором времени будет списана. Всего в приписном парке Карасук в эксплуатации 197 локомотивов серии ВЛ80С.

К основным предпосылкам обновления парка электровозов рассматриваемого полигона относятся:

- необходимость замены локомотивного парка, выработавшего свой ресурс;
- несоответствие технических параметров электровозов серии ВЛ80С для перевозки грузов на отдельных участках без использова-

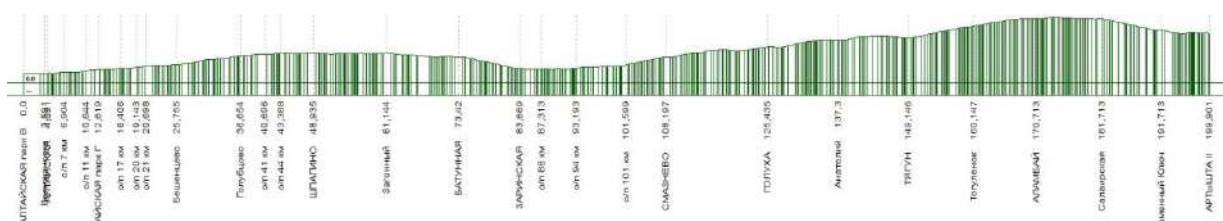


Рис. 2. Профиль пути участка Алтайская – Артышта 2 Западно-Сибирской железной дороги
Fig. 2. Track profile of the Altayskaya – Artyshka 2 section of the West Siberian railway

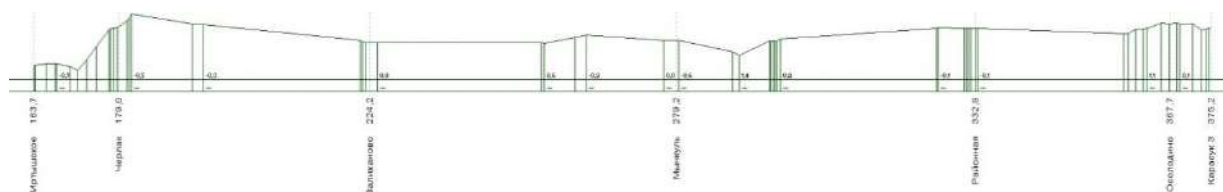


Рис. 3. Профиль пути участка Иртышское – Карасук Западно-Сибирской железной дороги
Fig. 3. Track profile of the Irtysh – Karasuk section of the West Siberian railway

ния подталкивающих локомотивов;

– повышение средних технической и участковой скоростей без снижения весовых норм на лимитирующих отрезках пути;

– снижение потребного парка электровозов и повышение экономической эффективности за счет сокращения стоимости жизненного цикла электровозов новой серии в сравнении с используемыми.

Для осуществления замены электровозов с истекшим сроком службы, а также с целью повышения эффективности перевозки грузов за счет снижения времени оборота локомотивов без уменьшения весовых норм поездов, необходимо приобретение современных магистральных грузовых электровозов.

Перспективным электровозом для выполнения заданного объема перевозочной работы на исследуемом участке может являться электровоз пятого поколения 2ЭС5К «Ермак». Он изначально был спроектирован на Новочеркасском электровозостроительном заводе для замены электровозов старых серий ВЛ80в/и и ВЛ60в/и. Он имеет лучшие тяговые характеристики в сравнении с ВЛ80С. На «Ермаке» установлено современное оборудование безопасности движения: КЛУБ-У, САУТ-ЦМ/485 и ТСКБМ. Также установлена микропроцессорная система управления с расширенной диагностикой оборудования МСУД-015 [17, 18]. Она предназначена для управления тяговым приводом и аппаратами цепей управления, поосного регулирования тяговыми электродвигателями (ТЭД), в том числе в режиме тяги с независимым возбуждением

ТЭД, и диагностирования основных систем электровоза для его защиты. Кроме того, МСУД-015 учитывает данные о состоянии бортового оборудования электровоза. Система может оперативно передавать информацию (через блок БРПД-003 по сетям стандарта GSM в режиме реального времени) на серверы завода и локомотивного депо о состоянии основного оборудования электровоза, об управляющих действиях машиниста и местоположении локомотива (определение координат с помощью системы ГЛОНАСС) при возникновении нештатных ситуаций. Усовершенствованы конструкция кабины управления, установлены термоэлектрические кондиционеры и панельные нагреватели, в целом улучшены условия работы локомотивной бригады (электровоз оборудован холодильником и сантехническим оборудованием) [19–22]. На рис. 4 представлен общий вид электровозов серии ВЛ80С и 2ЭС5К.

Согласно [12], на ст. Артышта 2 и ст. Заринская при движении поездов массой более 4 100 т необходимо использовать подталкивающий локомотив. Для прицепки к составу подталкивающего локомотива требуется остановка поезда, что ведет к снижению эксплуатационных показателей тягового подвижного состава: линейный пробег локомотива, коэффициент его участковой скорости, суточный пробег, расчетная скорость следования локомотива с поездом. Технические характеристики электровоза серии ЭС5К позволяют исключить подталкивающие локомотивы на тяговых плечах. В табл. 1 приведены технические характеристики электровозов



а



б

Рис. 4. Общий вид магистральных грузовых электровозов:
а – ВЛ80С; *б* – 2ЭС5К «Ермак»

Fig. 4. General view of mainline freight electric locomotives:
a – VL80S; *b* – 2ES5K «Ermak»

ВЛ80С, 2ЭС5К и 4ЭС5К [22].

Завод изготовитель при проектировании электровоза 2ЭС5К увеличил нормы межремонтных периодов в сравнении с ВЛ80С, что позволит снизить нагрузку на сервисные локомотивные депо, обслуживающие корпоративный

парк Среднесибирского хода Западно-Сибирской железной дороги. В табл. 2 приведены нормы технического обслуживания (ТО) и ремонта (ТР – текущий ремонт; СР – средний ремонт; КР – капитальный ремонт) рассматриваемых электровозов [23].

Таблица 1. Основные характеристики электровозов ВЛ80С, 2ЭС5К, 4ЭС5К

Table 1. Main characteristics of electric locomotives VL80S, 2ES5K, 4ES5K

Наименование параметра Parameter name	Значения параметров Parameter values		
	ВЛ80С	2ЭС5К	4ЭС5К
Осевая формула Axial formula	2(2 ₀ -2 ₀)	2(2 ₀ -2 ₀)	4(2 ₀ -2 ₀)
Масса, т Weight, t	192	192	400
Нагрузка на ось, т Axle load, t	24	24	25
Род тока и напряжение контактной сети The type of current and voltage of the contact network	Переменный ток номинальным напряжением 25 кВ Alternating current with rated voltage of 25 kV		
Двигатель Engine	НБ-418166	НБ-514Б	НБ-514Е
Мощность часового режима, кВт Hourly power, kW	6 520	6 560	13 120
Мощность длительного режима, кВт Continuous mode power, kW	6 160	6 120	12 240
Сила тяги часового режима, кН Traction force of hourly mode, kN	451	464	928
Сила тяги длительного режима, кН Long-term traction force, kN	409	423	845
Скорость часового режима, км/ч Hourly speed, km/h	51,6	49,9	51
Скорость длительного режима, км/ч Continuous mode speed, km/h	53,6	51	51
Скорость максимальная, км/ч Maximum speed, km/h	110	110	110
Коэффициент полезного действия, % Efficiency, %	84	86	86

Таблица 2. Периодичность выполнения технических обслуживаний и ремонтов

Table 2. Frequency of maintenance and repairs

Локомотив Locomotive	ТО-2, ч Maintenance, h		ТР-1, тыс. км	ТР-2, тыс. км	ТР-3, тыс. км	КР-1, тыс. км	КР-2, тыс. км
ВЛ80С	72		20	200	600	1 200	2 400
			ТР-50, тыс. км	ТР-250, тыс. км	ТР-500, тыс. км	СР, тыс. км	КР, тыс. км
2,4ЭС5К	Моторно-осевой подшипник скольжения, ч Motor-axial plain bearing, h	Моторно- осевой под- шипник качения, ч Motor-axial friction bearing, h	50	250	500	1 000	3 000
	72	240					

Расчет потребного парка на Среднесибирском ходу

По участку Артышта 2 – Иртышское ежегодно обеспечивается грузооборот в размере 55,2 млн т. Данный участок дороги характеризуется умеренной грузонапряженностью и профилем пути средней сложности. Существующие эксплуатационные условия на указанном участке Среднесибирского хода при действующем парке локомотивного хозяйства Западно-Сибирской железной дороги приводит к необходимости увеличения количества локомотивов (при использовании их в качестве подталкивающей тяги) и, соответственно, росту расходов

на их содержание. На основании проведенных теоретических тяговых расчетов с использованием данных [12, 24] в табл. 3 представлена сводная информация по составностям тяговых единиц в зависимости от массы поезда на тяговом плече Артышта 2 – Алтайская, имеющем лимитирующие уклоны.

Расчет потребного парка новых локомотивов для участка переменного тока Артышта 2 – Иртышская делается на основе [25]:

$$M_n = \frac{K_T \cdot K_L}{(1 - \alpha_L) \cdot 24} \cdot \left(\frac{2 \cdot L_p}{V_{уч.}} \cdot t_L \right) \cdot n_{гр},$$

где K_T – коэффициент кратности тяги; K_L – ко-

Таблица 3. Требуемые тяговые единицы для тягового плеча Артышта 2 – Алтайская

Table 3. Required traction units for the traction arm of the Artysh 2 – Altayskaya

Показатель Indicator	Направление Direction	Значение Value	Тяговая единица Traction unit	
			2ЭС5К	ВЛ80С
Среднестатистическая масса поезда, т Average train weight, t	Четное	3 900	1	1
	Нечетное	5 700	1	1+1 толкач
Весовая норма поезда, т Weight norm of the train, t	Четное	6 000	1	1
	Нечетное	6 200	1	1+1 толкач
Перспективная весовая норма поезда, т Perspective weight norm of the train, t	Четное	6 600	1	1
	Нечетное	7 000	1+1 толкач	1+1 толкач

Таблица 4. Потребный парк локомотивов на участке переменного тока Артышта 2 – Иртышское Западно-Сибирской железной дороги

Table 4. The required fleet of locomotives on the alternating current section of Artysh 2 – Irtyshskoe West Siberian Railway

Наименование параметра Parameter name	ВЛ80С	2ЭС5К
Коэффициент, учитывающий неравномерность движения Coefficient taking into account uneven movement	1,2	1,2
Коэффициент учитывающий кратность тяги Coefficient taking into account the traction multiplicity	1	1
Доля неисправных локомотивов, зависящая от величины межремонтных пробегов, времени простоя локомотива на плановых и внеплановых ремонтах Share of out-of-service locomotives, depending on the length of overhaul runs, locomotive downtime for scheduled and unscheduled repairs	0,15	0,04
Длина расчетного участка, км / Estimated section length, km	872	872
Длина расчетного участка (туда и обратно), км The length of the estimated section (both ways), km	1 744	1 744
Участковая скорость, км/ч / Local speed, km/h	51,3	51,3
Среднее время простоя, ч / Average idle time, h	3	3
Объем перевозок в груженом направлении, млн т The volume of traffic in the loaded direction, million tons	55,2	55,2
Количество дней в году / Number of days in a year	365	365
Средний вес поезда, т / Average train weight, t	5 600	6 300
Соотношение массы поезда нетто к массе брутто / Ratio of train net to gross weight	1,00	1,00
Итоговый потребный парк / Total required park	199	170
Коэффициент учета роста производительности 2ЭС5К по сравнению с ВЛ80С Accounting factor for productivity growth 2ЭС5К compared to ВЛ80С	1,17	

ээффициент неравномерности движения; α_n – доля неисправных локомотивов, зависящая от величины межремонтных пробегов, времени простоя локомотива на плановых и внеплановых ремонтах; L_p – длина расчетного участка; $V_{уч}$ – участковая скорость; $t_{л}$ – среднее время простоя; $n_{гр.}$ – число поездов в груженом направлении, пар поездов в сутки.

Число поездов в груженом направлении определяется по формуле:

$$n_{гр} = \frac{\Gamma_{гр} \cdot 10^6}{365 \cdot Q_{сп} \cdot \gamma}$$

где $\Gamma_{гр}$ – объем перевозок в груженом направлении, млн т; 365 – количество дней в году; $Q_{сп}$ – средний вес поезда, т; γ – соотношение массы поезда нетто к массе брутто [25]. Сводные данные и результаты расчетов представлены в табл. 4.

Заключение

В настоящее время в ОАО «РЖД» ведется работа по обновлению корпоративного локомотивного парка. В первую очередь подлежат замене локомотивы, которые эксплуатируются на участках железных дорог Восточного полигона [10]. Устаревающие магистральные грузовые электровозы переменного тока ВЛ80С, эксплуатирующиеся на Среднесибирском ходу, без сомнений в скором будущем

подлежат замене на электровозы, которые будут отвечать современным техническим требованиям и способствовать увеличению пропускной и провозной способностей Западно-Сибирской железной дороги. Таким локомотивом является магистральный грузовой электровоз пятого поколения серии ЭС5К. Он зарекомендовал себя как надежный локомотив во время эксплуатации на Восточном полигоне.

По результатам расчетов установлено, что для существующего объема перевозочной работы на участке Артышта 2 – Иртышское Западно-Сибирской железной дороги требуется на 29 двухсекционных электровозов серии ЭС5К меньше, чем двухсекционных электровозов ВЛ80С, которые в настоящее время находятся в эксплуатации на участках Среднесибирского хода. В рамках дальнейшего исследования перспектив использования в эксплуатации на рассматриваемых участках электровозов серии ЭС5К необходимо произвести расчет технико-экономического обоснования замены парка локомотивов серии ВЛ80С Западно-Сибирской железной дороги новыми электровозами методом сравнения затрат на приобретение и эксплуатацию новых локомотивов с затратами по обновлению и содержанию существующего парка электровозов.

Список литературы

1. Дяо Сюэха. Экономическое сотрудничество северо-восточного региона Китая и ДВ России в новых условиях: состояние, возможности и предложение // Теоретическая экономика. 2022. №1. С. 70–78.
2. Андрианова Е.В., Давыденко В.А., Ушакова Ю.В. Риски продовольственной безопасности в контекстах новой глобальной реальности // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Социально-экономические и правовые исследования. 2022. Т. 8. № 2 (30). С. 6–66.
3. Обзор рынка железнодорожных контейнерных, морских и авиаперевозок в сообщении Китай – Европа – Китай // П.В. Куренков, С.П. Вакуленко, А.П. Иванов и др. // Вестник СамГУПС. 2022. № 2 (56). С. 25–33.
4. Щербанин Ю.А. Сибирь – Дальний Восток: грузоперевозки в направлении морских портов, влияние внешних факторов. // Вопросы новой экономики. 2022. № 2 (62). С. 47–58.
5. Юматов И.Н. Проблемы развития контейнерных перевозок // Железнодорожный транспорт. 2022. № 8 (30). С. 17–19.
6. Меркулов А.С., Иванова В.С. Анализ проблем инвестирования в Восточный полигон и пути их решения // Молодая наука Сибири. 2022. №2 (16). С. 426–435 : электрон. науч. журн. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/611> (Дата обращения 18. 11.2022).
7. Катровский А.П. Эволюция транспортной сети Российско-Белорусского приграничья: опыт историко-географического исследования // Вестн. Балт. федер. ун-та им. И. Канта. Сер. Естественные и медицинские науки. 2022. № 2. С. 5–29.
8. Осминин А.Т. Научные подходы к расчету границ полигонов управления перевозочным процессом и реализации полигонных технологий // Бюл. Объединённого учёного совета ОАО «РЖД». 2017. № 2. С. 42–57.
9. Хохрина О.И. Кузбасс-2035: территория как драйвер роста экономики // Мир экономики и управления. 2020. Т. 20. № 4. С. 61–77.
10. Годовой отчет открытого акционерного общества «Российские железные дороги» за 2021 год. М. : ОАО «РЖД», 2022. 143 с.
11. Западносибирская железная дорога // rzd.ru : сайт. URL: <https://zsrd.rzd.ru/ru/2770> (Дата обращения: 5.11.2022).
12. Об установлении норм масс и длин пассажирских и грузовых поездов на участках, обслуживаемых Западносибирской дирекцией тяги : приказ дирекции тяги ОАО «РЖД» от 10.10.2018 № ЦТ-224.

13. Об утверждении Инструкции по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины на железнодорожных путях общего пользования ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 01.09.2016 № 1799р.
14. Об утверждении Инструкции по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины на инфраструктуре Западносибирской железной дороги: приказ начальника Западносибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» от 04.07.2017 № 3-Сиб-230.
15. Режимные карты вождения грузовых поездов электровозами эксплуатационного локомотивного депо Карасук. Западносибирская дирекция тяги. Новосибирск: ДТ ЗС, 2008. 216 с.
16. О Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы: постановление Правительства РФ № 1 от 01.01.2002 (ред. от 27.12.2019). Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс».
17. Кабанцев А.А. Некоторые изменения в конструкции электровозов 2ЭС5К «ЕРМАК» // Локомотив. 2017. № 1 (721). С. 30–31.
18. Электровозы 2ЭС5К, 3ЭС5К: устранение неисправностей в электрических цепях // Локомотив. 2011. № 5 (653). С. 16–18.
19. Баранов В. А., Викулов И. П., Киселев А.А. Оценка тяговых возможностей электровозов серий ВЛ80в/и 2ЭС5К, следующих с поездами установленных весовых норм на участке Пергуба – Новый Поселок без подталкивания и кратной тяги // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век: материалы VI междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2018. Т. 1. С. 113–120.
20. Денисенко К.П., Солтус К.П., Усвицкий С.А. Бустерная секция электровоза переменного тока 2ЭС5К // Вестн. Всерос. науч.-исслед. и проект.-констр. ин-та электровозостроения. 2006. № 3. С. 78–83.
21. Никонов В.В., Юренко И.К., Калюжный А.А. Анализ результатов эксплуатации грузовых электровозов «Ермак» и пути повышения их эксплуатационных показателей // Вестн. Всерос. науч.-исслед. и проект.-констр. ин-та электровозостроения. 2009. № 1. С. 177–187.
22. Кинжигазиев В.В. Самый мощный в мире электровоз 4ЭС5К // Журнал для партнеров Трансмашхолдинг. 2014. № 4 (12). С. 11–15.
23. О нормах межремонтных пробегов железнодорожного подвижного состава, эксплуатируемого на инфраструктуре ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 11.08.2016 № 1651р.
24. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы: распоряжение ОАО «РЖД» от 12.05.2016 г. № 867р.
25. Айзинбуд С.Я., Кельперис П.И. Эксплуатация локомотивов. М.: Транспорт, 1980. 262 с.

References

1. Dyaoy Syuhua. Ekonomicheskoe sotrudnichestvo severo-vostochnogo regiona Kitaya i DV Rossii v novykh usloviyakh: sostoyaniye, vozmozhnosti i predlozheniye [Economic cooperation between the Northeast region of China and the Far East of Russia in new conditions: status, opportunities and offer]. *Teoreticheskaya ekonomika* [Theoretical economics], 2022, no. 1, pp. 70–78.
2. Andrianova E.V., Davydenko V.A., Ushakova Yu.V. Riski prodovol'stvennoi bezopasnosti v kontekstakh novoi global'noi real'nosti [Food security risks in the context of a new global reality]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Social'no-ekonomicheskie i pravovye issledovaniya* [Bulletin of the Tyumen State University. Socio-economic and legal studies], 2022, vol. 8, no. 2 (30), pp. 6–66.
3. Kurenkov P.V., Vakulenko S.P., Ivanov A.P., Husnutdinov A.I. Obzor rynka zheleznodorozhnykh konteynernykh, morskikh i aviaperevozok v soobshchenii Kitai - Evropa – Kitai [Overview of the railway container, sea and air transportation market in China- Europe – China]. *Vestnik SamGUPS* [Bulletin of Samara State Transport University], 2022, no. 2 (56), pp. 25–33.
4. Shcherbanin Yu.A. Sibir' – Dal'nii Vostok: gruzoperevozki v napravlenii morskikh portov, vliyaniye vneshnikh faktorov [Siberia – Far East: cargo transportation in the direction of seaports, the influence of external factors]. *Voprosy novoi ekonomiki* [Issues of the new economy], 2022, no. 2 (62), pp. 47–58.
5. Yumatov I.N. Problemy razvitiya konteynernykh perevozok [Problems of container transportation development]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2022, no. 8 (30), pp. 17–19.
6. Merkulov A.S., Ivanova V.S. Analiz problem investirovaniya v Vostochnyi poligon i puti ikh resheniya [Analysis of the problems of investing in the Eastern Polygon and ways to solve them]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2022, no. 2 (16), pp. 426–435.
7. Katrovskii A.P. Evolyutsiya transportnoi seti Rossiisko-Belorussskogo prigranich'ya: opyt istoriko-geograficheskogo issledovaniya [Evolution of the transport network of the Russian-Belarusian border area: the experience of historical and geographical research]. *Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: estestvennye i meditsinskie nauki* [Bulletin of the Baltic Federal University named after I. Kant. Series: Natural and Medical Sciences], 2022, no. 2, pp. 5–29.
8. Os'minin A.T. Nauchnye podkhody k raschetu granits poligonov upravleniya perevozochnym protsessom i realizatsii poligonnykh tekhnologii [Scientific approaches to the calculation of the boundaries of polygons for the management of the transportation process and the implementation of landfill technologies]. *Byulleten' Ob'edinyonnogo uchenogo soveta OAO «RZHD»* [Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC «Russian Railways»], 2017, no. 2, pp. 42–57.
9. Khokhrina O.I. Kuzbass-2035: territoriya kak draiver rosta ekonomiki [Kuzbass-2035: territory as a driver of economic growth]. *Mir ekonomiki i upravleniya* [The world of economics and Management], 2020, vol. 20, no. 4, pp. 61–77.
10. Godovoi otchet otkrytogo akionernogo obshchestva «Rossiiskie zheleznye dorogi» za 2021 god [Annual report of the Open Joint Stock Company «Russian Railways» for 2021]. Moscow: RZHD Publ., 2022. 143 p.
11. Zapadnosibirskaya zheleznaya doroga (Elektronnyi resurs) [West Siberian Railway (Electronic resource)]. Available at: <https://zszd.rzd.ru/ru/2770> (Accessed November 5, 2022).
12. Prikaz direktsii tyagi OAO «RZHD» ot 10.10.2018 no TST-224 «Ob ustanovlenii norm mass i dlin passazhirskikh i gruzovykh poezdov na uchastkakh, obsluzhivaemykh Zapadnosibirskoi direktsiei tyagi» [Order of the Traction Directorate of JSC

«Russian Railways» dated October 10, 2018 No. TST-224 «About establishment of norms of masses and lengths of passenger and freight trains on the sections serviced by the West Siberian Traction Directorate»].

13. Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 01.09.2016 no. 1799r «Ob utverzhdenii Instruktsii po organizatsii obrashcheniya gruzovykh poezdov povyshennoi massy i dliny na zheleznodorozhnykh putyakh obshchego pol'zovaniya OAO «RZHD» [Order of JSC «Russian Railways» dated September 1, 2016 No. 1799r «On approval of the Instructions on the organization of the circulation of freight trains of increased mass and length on public Railway lines of JSC «Russian Railways»].

14. Prikaz nachal'nika Zapadnosibirskoi zheleznoi dorogi – filiala OAO «RZHD» ot 04.07.2017 no. Z-Sib-230 «Ob utverzhdenii Instruktsii po organizatsii obrashcheniya gruzovykh poezdov povyshennoi massy i dliny na infrastrukture Zapadnosibirskoi zheleznoi dorogi» [Order of the Head of the West Siberian Railway – branch of JSC «Russian Railways» dated July 4, 2017 No. Z-Sib-230 «About the approval of the Instruction on the organization of the circulation of freight trains of increased weight and length on the infrastructure of the West Siberian Railway»].

15. Rezhimnye karty vozheniya gruzovykh poezdov elektrovozami ekspluatatsionnogo lokomotivnogo depo Karasuk. Zapadnosibirskaya direktsiya tyagi [Mode maps of driving freight trains by electric locomotives of the Karasuk operational locomotive depot. West Siberian Traction Directorate]. Novosibirsk: DT ZS Publ., 2008. 216 p.

16. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 01.01.2002 no. 1 (red. ot 27.12.2019) «O Klassifikatsii osnovnykh sredstv, vkluchayemykh v amortizatsionnye gruppy» [Decree of the Government of the Russian Federation No. 1 of January 1, 2002 (ed. of December 27, 2019) «On the Classification of fixed assets included in Depreciation groups»].

17. Kabantsev A.A. Nekotorye izmeneniya v konstruksii elektrovozov 2ES5K «ERMAK» [Some changes in the design of electric locomotives 2ES5K «ERMAK»]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2017, no. 1 (721), pp. 30–31.

18. Elektrovozy 2ES5K, 3ES5K: ustraneniye neispravnosti v elektricheskikh tsepyakh [Electric locomotives 2ES5K, 3ES5K: troubleshooting in electrical circuits]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2011, no. 5 (653), pp. 16–18.

19. Baranov V.A., Vikulov I.P., Kiselev A.A. Otsenka tyagovykh vozmozhnosti elektrovozov serii VL80v/i 2ES5K, sleduyushchikh s poezdami ustanovlennykh vesovykh norm na uchastke Perguba – Novyi Poselok bez podtalkivaniya i kratnoi tyagi [Evaluation of the traction capabilities of electric locomotives of the VL80v/i and 2ES5K series, following with trains of established weight standards on the Perguba – New Settlement section without pushing and multiple traction]. *VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Lokomotivy. Elektricheskii transport. XXI vek»* [Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference «Locomotives. Electric transport. XXI century»]. Saint Petersburg, 2018, vol. 1, pp. 113–120.

20. Denisenko K.P., Soltus K.P., Usvitskii S.A. Busternaya sektsiya elektrovoza peremennogo toka 2ES5K [Booster section of the 2ES5K AC electric locomotive]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroyeniya* [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Engineering], 2006, no. 3, pp. 78–83.

21. Nikonov V.V., Yurenko I.K., Kalyuzhnyi A.A. Analiz rezul'tatov ekspluatatsii gruzovykh elektrovozov «Ermak» i puti povysheniya ih ekspluatatsionnykh pokazatelei [Analysis of the results of operation of cargo electric locomotives «Ermak» and ways to improve their performance]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroyeniya* [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Engineering], 2009, no. 1, pp. 177–187.

22. Kinzhigaziev V.V. Samyi moshchnyi v mire elektrovoz 4ES5K [The world's most powerful electric locomotive 4ES5K]. *Zhurnal dlya partnerov Transmashkholding* [Magazine for Transmashholding partners], 2014, no. 4 (12), pp. 11–15.

23. Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 11.08.2016 no. 1651r «O normakh mezhremontnykh probegov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava, ekspluatiruemogo na infrastrukture OAO «RZHD» [Order of JSC «Russian Railways» dated August 11, 2016 No. 1651r «On the norms of inter-repair runs of railway rolling stock operated on the infrastructure of JSC «Russian Railways»].

24. Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 12.05.2016. no. 867r «Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» [Order of JSC «Russian Railways» dated May 12, 2016 No. 867r «Rules of traction calculations for train work»].

25. Aizinbud. S.Ya., Kel'peris P.I. Ekspluatatsiya lokomotivov [Operation of locomotives]. Moscow: Transport Publ., 1980. 262 p.

Информация об авторах

Доманов Кирилл Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: dki35@ya.ru.

Давыдов Вадим Артёмович, кафедра подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: davydov99@icloud.com.

Information about the authors

Kirill I. Domanov, Ph.D in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: dki35@ya.ru.

Vadim A. Davydov, Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: davydov99@icloud.com.

Управление инцидентами при оперативном контроле состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики центрами технической диагностики и мониторинга

А.В. Пультяков✉, В.А. Алексеенко

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

✉pulyakov@irgups.ru

Резюме

В данной статье рассматриваются вопросы управления инцидентами, возникающими при технической эксплуатации устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики на железных дорогах Восточного полигона ОАО «РЖД», т.е. диагностическими ситуациями, способными потенциально привести к нарушению работоспособности устройств, требующих расследования, устранения или контроля инженерами центров технической диагностики и мониторинга. Приведен перечень программного обеспечения, которое используется для организации функционирования центров технической диагностики и мониторинга состояния систем и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, рассмотрено взаимодействие таких программных средств. Показана общая структура центров технической диагностики и мониторинга, перечислены их основные задачи и функции, определены структурные особенности центров с учетом специфики железных дорог Восточного полигона и представлен порядок работы с инцидентами. Обозначены особенности применения специализированных программных средств и основные принципы управления инцидентами за счет обработки данных, поступающих с низовых систем диспетчерской централизации, диспетчерского контроля и других средств технической диагностики и мониторинга. Подробно рассмотрены программы «Мониторинг» и «Инциденты», описаны режимы их работы, приведены примеры информационных окон программного обеспечения для реальных инцидентов с устройствами железнодорожной автоматики и телемеханики. Проведена оценка результатов анализа показателей по обработке инцидентов для четырех железных дорог Восточного полигона – Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской и Дальневосточной. Определена средняя интенсивность обработки инцидентов на железных дорогах Восточного полигона.

Ключевые слова

мониторинг, железнодорожная автоматика и телемеханика, техническая диагностика, инцидент, система технической диагностики и мониторинга, безопасность движения поездов

Для цитирования

Пультяков А.В. Управление инцидентами при оперативном контроле состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики центрами технической диагностики и мониторинга / А.В. Пультяков, В.А. Алексеенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 192–205. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).192-205.

Информация о статье

поступила в редакцию: 7.11.2022 г.; поступила после рецензирования: 2.12. 2022 г.; принята к публикации: 5.12. 2022 г.

Incident management during operational monitoring of the state of railway automation and telemechanics devices by technical diagnostics and monitoring centers

A.V. Pulyakov✉, V.A. Alekseenko

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉pulyakov@irgups.ru

Abstract

This article discusses the management of incidents arising during the technical operation of devices and systems of railway automation and telemechanics on the railways of the Eastern Range of Russian Railways, that is, diagnostic situations that can potentially lead to a malfunction of devices that require investigation, elimination or control by engineers of technical centers, diagnostics and monitoring. The list is given and the interaction of software is considered, which is used to organize the functioning of centers for technical diagnostics and monitoring the state of systems and devices of railway automation and telemechanics. The general structure of the centers for technical diagnostics and monitoring is shown, their main tasks and functions are considered, the structural features of the centers are determined taking into account the specifics of the railways of the Eastern range and the procedure for working with incidents is presented. The features of the use of specialized software tools and the basic principles of incident management by processing data from lower systems of dispatcher centralization, dispatcher control and

other means of technical diagnostics and monitoring are considered. The programs «Monitoring» and «Incidents» are considered in detail, their modes of operation are described, examples of software information windows for real incidents with railway automation and remote control devices are given. An assessment of the results of the analysis of indicators for handling incidents for four railways of the Eastern range - Krasnoyarsk, East Siberian, Transbaikal and Far East is given. The average intensity of handling incidents on the railways of the Eastern range was determined.

Keywords

monitoring, railway automatics and telemechanics, technical diagnostics, incident, technical diagnostics and monitoring system, train safety

For citation

Pultyakov A.V., Alekseenko V.A. Upravlenie intsidentami pri operativnom kontrole sostoyaniya ustroystv zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki tsentrami tekhnicheskoi diagnostiki i monitoringa [Incident management during operational monitoring of the state of railway automation and telemechanics devices by technical diagnostics and monitoring centers]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 192–205. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).192-205.

Article info

Received: November 7, 2022; Revised: December 2, 2022; Accepted: December 5, 2022.

Введение

Среди множества систем технической диагностики и мониторинга лидирующую позицию по объему внедрения на сети ОАО «РЖД» занимает система аппаратно-программного комплекса диспетчерского контроля (АПК-ДК). На базе системы построены 12 дорожных центров технической диагностики и мониторинга (ЦТДМ) устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). В это число входит Восточно-Сибирская дирекция инфраструктуры, в состав которой ЦТДМ введен с 2012 г.

Внедрение ЦТДМ значительно подняло показатели производительности труда в хозяйствах Центральной дирекции инфраструктуры (ЦДИ). Пользователями автоматизированных рабочих мест (АРМ) системы ТДМ являются технологи (инженеры по мониторингу), основная функция которых – постоянный анализ информации об отклонениях в работе устройств ЖАТ с использованием инструментов удаленного контроля и диагностики, предоставляемых системой ТДМ. При этом фактически основной объем поступающей в центр диагностики информации – это данные, сформированные в результате некорректной работы устройств диагностики и неудовлетворительного состояния устройств ЖАТ [1].

Решить вопрос повышения информативности и достоверности тревожных сообщений возможно путем функционального развития, применения современных программных и технических средств. Они направлены на совершенствование алгоритмов работы подсистемы логического контроля на станциях и перегонах,

а также алгоритмов обработки информации, принимаемой от устройств ЖАТ [2–5]. В настоящий момент времени удалось добиться уменьшения количества препятствий на пути реализации общесетевой системы мониторинга [6, 7] за счет активного создания и внедрения новых технических решений и организационных мероприятий, в основе которых лежат современные информационные технологии и цифровые системы [8–14].

Структура и техническая оснащенность центров технической диагностики и мониторинга

Центры технической диагностики и мониторинга предназначены для повышения надежности работы устройств ЖАТ, непосредственно обеспечивающих безопасность и бесперебойность перевозочного процесса, за счет оперативного контроля их технического состояния. Типовая организационная структура ЦТДМ представлена на рис. 1.

Функционирование ЦТДМ обеспечивается на основе взаимодействия следующих программных продуктов:

1. Комплекс задач (КЗ) «Мониторинг» – программа, которая является клиентским приложением комплекса АРМ-Ш (ШЧ). Данная программа предназначена для мониторинга эксплуатационных показателей хозяйства автоматики и телемеханики (Ш) и дистанций (ШЧ) сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), а также для просмотра и контроля поездной ситуации на перегонах и станциях

средствами ТДМ, просмотра архива поездного положения.

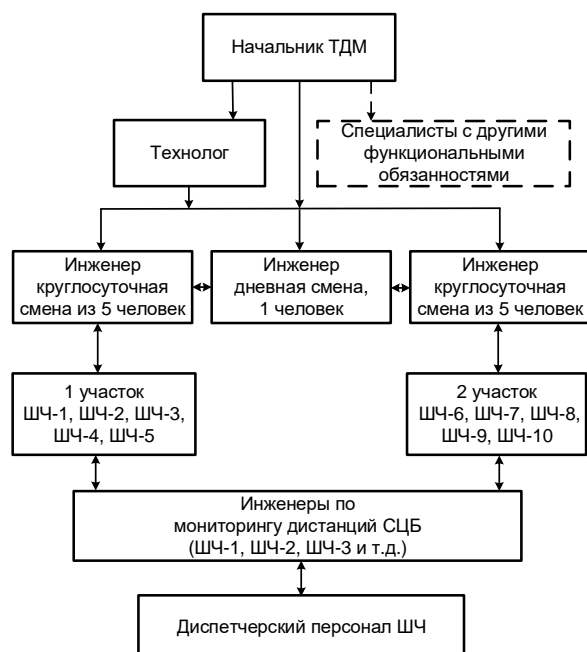


Рис. 1. Организационная структура центров технической диагностики и мониторинга
Fig. 1. Organizational structure of the center of technical diagnostic and monitoring

2. Программное обеспечение (ПО) «Инциденты» – программа является клиентским приложением комплекса АРМ-Ш (ШЧ). Предназначена для удобства пользователя в анализе и структурировании ситуаций по определенным параметрам и характеристикам.

3. АСУ-Ш-2 – комплексная автоматизированная система управления хозяйством сигнализации, централизации и блокировки второго поколения, разработана и развивается в рамках программы информатизации ОАО «РЖД» [15].

4. ГИД «Урал-ВНИИЖТ» (График исполненного движения) – система предназначена для управления ходом перевозочного процесса с автоматизированных рабочих мест диспетчерского и руководящего аппарата всех уровней управления эксплуатационной работой. Кроме того, информационные возможности системы используются работниками других служб и ведомств. Она включает в себя функции прогнозирования, планирования, контроля, регулирования, учета и анализа.

5. Единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой (ЕК АСУИ). Типовая система управления те-

кущим содержанием объектов эксплуатационной инфраструктуры, предназначенная для автоматизации процессов содержания объектов.

В работе ЦТДМ применяется ряд специфических терминов и понятий:

1. Диагностические ситуации – множество событий, фиксируемых в программном обеспечении мониторинга. Примерами диагностических ситуаций могут быть отказы, предотказы, технологические ситуации, фиксируемые в АРМ систем ТДМ.

2. Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

3. Предотказным состоянием устройств (предотказом) ЖАТ является его состояние, при котором устройство работает в соответствии с предъявляемыми к нему требованиями, но некоторые его параметры (фиксируемые средствами ТДМ) близки к критическим значениям относительно установленных норм [16]. Предотказным состоянием устройств ЖАТ является нарушение нормальной работы технических устройств в случае, если указанное состояние устройств выявлено только по показаниям средств ТДМ и не учтено согласно Положениям об учете, расследовании и анализе отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО «РЖД» [17].

4. Термин «инцидент» обозначает информационное сообщение (событие) или группу диагностических ситуаций, объединенных по заданному правилу, являющихся следствием нарушения или способных потенциально привести к нарушению работоспособности устройств СЦБ, требующие расследования, устранения или контроля со стороны инженеров по мониторингу [18].

Программа «Мониторинг»

Работа программы возможна в нескольких режимах:

- режим просмотра диагностических и эксплуатационных показателей хозяйства Ш (ШЧ), просмотр цифр, таблиц и графиков;
- режим просмотра статистики по диагностическим и эксплуатационным показателям хозяйства Ш (ШЧ), просмотр цифр и графиков;
- режим просмотра поездного положения в реальном режиме времени или архивных данных.

Данная программа выполняет следующие основные функции:

– отображение текущих показателей хозяйства Ш (ШЧ) по предприятиям, местам за смену, сутки, неделю, месяц, квартал и год;

– отображение статистики показателей с разбивкой по предприятиям, местам и по времени;

– отображение текущего состояния или архива поездного положения;

– отображение поездного положения на нескольких видах («Дистанция», «Круг», «Станция / Перегоны» и «Пульт») с возможностью быстрого перехода от одного вида к другому;

– отображение мгновенных значений различных параметров объектов контроля (напряжения в рельсовых цепях и на фидерах, сопротивления изоляции кабеля и т. д.) непосредственно на пульте станции или перегоне, а также их графиков;

– выделение объектов, по которым выявлены состояния отказа или предостережения, а также отображение суммарного количества отказов и предостережений по станциям, перегонам, дистанциям и дорогам;

– работа с несколькими устройствами отображения;

– настройка пользовательского интерфейса (цвет фона, опции работы с архивом, звуковое оформление и др.);

– печать всех предоставляемых пользователю данных.

КЗ «Мониторинг» представляет собой АРМ, позволяющее просматривать диагностическую информацию в различных масштабах: от всей сети железных дорог России, конкретной железной дороги, определенного участка до станции (перегона) и сложного технического объекта (например, электропитающей установки). Переходы от менее детализированных объектов к более детализированным и наоборот осуществляются манипулятором «мышь». Используемые обозначения состояний диагностируемых объектов приняты в соответствии с действующим отраслевым стандартом.

Простейшим звеном контроля является отображение станции (перегона), где индицируется состояние устройств ЖАТ (наличие электропитания, режим горения сигналов, контроль предохранителей, сигнализаторов заземления и т. д.), мнемосхема путевого развития со всеми устройствами ЖАТ (повторителями светофоров, границами рельсовых цепей, устройствами ограждения и пр.) с указанием их технического состояния и численными данными измерений.

КЗ «Мониторинг» выполнен с учетом психологических особенностей восприятия цветов человеком: наиболее тревожное состояние указывается красным мигающим цветом, а нахождение объекта в исправном состоянии – зеленым либо белым цветами. Так, в индикации рельсовых цепей выделяются несколько цветов: красный, сигнализирует о логической занятости, желтый – о замкнутости стрелочно-путевой секции или участка пути в маршруте; желтый мигающий, обозначает режим искусственной разделки секции, черный – свобода рельсовой цепи, серый – потерю диагностической информации. Для светофоров горение разрешающих показаний указывается зеленым цветом, запрещающего показания – красным, потеря диагностической информации – серым. Стрелки в плюсовом положении подсвечиваются зеленым, в минусовом – желтым цветом. На отображении станции присутствуют также индикаторы стрелочных коммутаторов, стиль представления которых аналогичен исполнению пультов манипуляторов дежурных по станциям (зеленый – плюсовое положение, желтый – минусовое, красный – потеря контроля).

Кроме дискретной информации о состоянии устройств ЖАТ в КЗ «Мониторинг» можно видеть результаты предусмотренных разработчиком измерений, например, напряжения на путевых элементах рельсовых цепей, напряжения источников питания и пр. Они высвечиваются цифрами, вписанными в прямоугольное поле. В случае, если измеренное значение находится в норме, цифры горят черным цветом, предостереженное состояние обозначается желтым мигающим цветом измеренного значения в индикаторе, выход за границы работоспособности – красным мигающим цветом измеренного значения в поле индикатора.

Помимо информации о состоянии всех объектов контроля на станции, КЗ «Мониторинг» выдает сообщение об общем числе отказов и предостережений, возникших на станции и на текущий момент не устраненных, что показывается большими цифрами справа от наименования станции: красный шрифт соответствует числу отказов, желтый – числу предостережений.

Программное обеспечение «Инциденты»

Основным методом оперативного контроля состояния устройств ЖАТ является управление инцидентами в ПО «Инциденты».

Формирование инцидента происходит автоматически при выявлении каждой новой диагностической ситуации. При наличии инцидента с незаконченным статусом и выявлении новой диагностической ситуации по данному объекту с аналогичным классификатором проявлений ситуация автоматически попадает в текущий инцидент.

В целях исключения рисков пропуска диагностической ситуации в ПО «Инциденты» на уровне центра возможна настройка программного обеспечения, предотвращающая автоматическое попадание ситуаций в незаконченные инциденты (функция принудительного закрытия возможности редактирования карточки, автоматическое закрытие карточек по истечении времени).

Карточка инцидента состоит из нескольких вкладок и полей. Часть из них несет текстовую диагностическую информацию, другая часть необходима для заполнения инженером по мониторингу в процессе работы с инцидентом. В карточке имеется пять вкладок – «Описание», «Устранение», «Действия», «Данные ЕК АСУИ» и «Файлы».

Вкладка «Описание» состоит из полей:

1. Статус – отображает статус инцидента в зависимости от заполнения полей карточки инцидента в совокупности с данными состояния рабочего задания ЕК АСУИ.

2. Время – отображает время начала первой выявленной диагностической ситуации инцидента.

3. Есть в КЗ «Учет отказов» (УО) – позволяет инженеру поставить отметку о наличии отказа технического средства, связанного с диагностической ситуацией в инциденте.

4. Место (два поля) – первое поле (верхнее) отображает место возникновения диагностической ситуации, позволяет выбрать объект вручную в случае объединения ситуаций по разным объектам контроля, второе поле (нижнее) отображает перечень объектов контроля, на которых выявлены диагностические ситуации.

5. Проявление (два поля) – первое поле (верхнее) отображает тип проявления диагностической ситуации инцидента, позволяет выбрать из выпадающего списка истинное проявление в случае некорректного восприятия программой диагностической ситуации, второе поле отображает перечень типов проявлений всех диагностических ситуаций инцидента.

6. Важность – позволяет выбрать из выпадающего списка степень важности инцидента (критически важны, очень важный, важный, низкая важность, неважный).

7. План в ШЧ – позволяет установить плановую дату устранения инцидента.

8. Кому передано в ШЧ – позволяет выбрать из списка либо вписать вручную работника, которому передана информация об инциденте, включает дату и время передачи.

Вкладка «Устранение» представлена на рис. 2 и состоит из следующих полей:

1. Статус – отображает статус инцидента в зависимости от заполнения полей карточки инцидента в совокупности с данными состояния рабочего задания ЕК АСУИ. Также отображает уникальный номер карточки инцидента.

2. Тип – позволяет классифицировать инцидент, присвоив ему один из следующих типов: неисправность, техническое обслуживание и ремонт (ТОиР), недостатки диагностики, технологическая ситуация, выключенное устройство.

3. Комментарий – позволяет внести дополнительную текстовую информацию, связанную с расследованием инцидента.

4. Сообщено – позволяет выбрать из списка либо вписать вручную работника, которому передана информация об инциденте.

5. Ответственный – позволяет выбрать из списка либо вписать вручную службу (работника), ответственную за возникновение инцидента. Содержит дату и время заполнения поля инцидента.

6. Крайний срок – автоматически проставляет крайнюю дату и время устранения инцидента в зависимости от его тревожности, позволяет вручную произвести изменение. Обязательно только для заполнения карточек инцидентов с типом неисправность.

7. Начало – автоматически проставляет дату и время классификации инцидента.

8. Причина – позволяет выбрать из списка классификатор причины возникновения инцидента и внести дополнительную текстовую информацию, касающуюся расследования инцидента.

9. Выполнил – автоматически заполняется в соответствии с рабочим заданием в ЕК АСУИ.

10. Факт – позволяет проставить дату и время окончания расследования инцидента.

11. Кнопка «Сохранить». Может изме-

няться название на «Подтвердить», «Закреть!». Нажимается для сохранения изменений, внесенных в поля карточки инцидента. Изменение названия на «Подтвердить» означает наличие завершеного рабочего задания в ЕКАСУ. Изменение названия на «Закреть!» означает, что инцидент вручную закрыт от редактирования, требуется открытие для возможности внесения изменений в карточку.

На рис. 3. представлена вкладка «Действия», отображающая историю работы с карточкой инцидента и позволяющая закрыть ее от редактирования.

Вкладка «Данные ЕК АСУИ» отображает данные соответствующего инциденту рабочего задания ЕК АСУИ. Позволяет подтвердить, либо отклонить причину, указанную в рабочем

задании. Вкладка «Файлы» позволяет прикрепить к карточке инцидента документацию, связанную с расследованием неисправности (акты, фотографии, оперативные приказы, протоколы).

Поле диагностических ситуаций отображает все ситуации данного инцидента. Позволяет осуществить переход в КЗ «Мониторинг» для просмотра архива по диагностической ситуации, выделить ситуацию в новый инцидент, просмотреть историю ситуации и объекта.

В зависимости от наполненности полей карточки инцидента во вкладке «Устранение» инцидент может иметь следующие статусы:

1. «Новый» – инцидент не классифицирован и не началось его расследование. Технически означает, что не выбран тип инцидента и не

Сервер: Всё хорошо (10:07:31) [#10:07:31] С 10.111.26.200 получено 65711 инцидентов.

Рис. 2. Карточка инцидента, вкладка «Устранение»

Fig. 2. Incident card, tab «Remedy»

Т. Время /	Действие	Удалено	Кто исправил
27.05.2022 20:46:35	Просмотрен		10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 20:46:35	Просмотрен		10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:06:48	Просмотр ситуации. Время нача...		10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:08:21	ШЧ-2 НИЖНЕУДИНС Сообщен...		10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:09:24	Статус:Устраняется (№379859)Да...	Статус:Новый (№379859)	10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:09:24	Статус:Устраняется (№379859)Да...	Статус:Новый (№379859)	10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:09:24	Статус:Устраняется		10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:11:49	Сообщено ШН Михлин		10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:12:26	Классиф.:НеисправностьПлан д...		10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:12:26	Классиф.:НеисправностьПлан д...		10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:12:26	Классиф.:Неисправность		10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:36:50	Восточно-Сибирская ж.д. Подтв...		10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:36:54	Прич.:Рельсовые цепи (Окалина...		10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:37:09	Статус:Екс.:128Статус:Законченн...	Статус:Устраняется (№379...	10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:37:09	Статус:Законченный		10.110.29.168(Кондрашев О.Д. СТДМ)
27.05.2022 22:39:25	ЕКАСУИ: ID в ЕКАСУИ 238083881		Сервер передачи в ЕК АСУИ

Рис. 3. Карточка инцидента, вкладка «Действия»

Fig. 3. Incident card, tab «Actions»

заполнено поле «Начало».

2. «Устраняется» – инцидент находится в работе у инженера по мониторингу. Технически означает, что поле «Начало» заполнено, но не заполнены одно или несколько других полей карточки инцидента.

3. «Закончен» – инцидент расследован. Заполнены поля «Ответственный», «Крайний срок», «Причина», «Факт».

4. «Разобранный» – промежуточный этап расследования инцидента. Инциденту присвоен тип и заполнено поле «Причина».

5. «Запланирован» – установлен плановый срок расследования инцидента. Заполнено поле «План в ШЧ» вкладки «Описание».

6. «Принят» – инцидент принят для расследования в ШЧ.

7. «Выполненный» – есть данные рабочего задания ЕК АСУИ соответствующего инцидента. Заполнено поле «Выполнил».

8. «Выключенный» – инциденту присвоен тип «Выключенное устройство».

Управление инцидентами является задачей инженера по мониторингу. Стратегия управления инцидентами заключается в последовательной реализации следующих функций:

- анализ диагностической ситуации;
- сбор необходимой информации для классификации инцидента;
- классификация инцидента;
- заполнение информационных полей карточки инцидента;
- эскалация инцидента (в случае выявления факта повторяемости или высокой критичности неисправности);
- организация устранения неисправности согласно действующему регламенту взаимодействия;
- закрытие инцидента с контролем качества расследования неисправности.

Основные принципы управления инцидентами

Выявление диагностических ситуаций происходит за счет обработки данных, поступающих с низовых систем диспетчерской централизации (ДЦ), ДК, ТДМ, на уровне унифицированных серверов систем ТДМ. Для выявления ситуаций используются специализированные алгоритмы и программные модули [19–21]. Каждая ситуация имеет следующие основные признаки: время начала (дата и время

начала проявления, которое было расценено программой как диагностическая ситуация); длительность (продолжительность диагностической ситуации); место (станция или перегон, в границах которых выявлена диагностическая ситуация); объект контроля (объект мнемосхемы КЗ «Мониторинг», на котором произошло выявление диагностической ситуации).

Инженер по мониторингу получает диагностические ситуации в ПО «Инциденты». Интенсивность потока инцидентов должна позволять инженеру производить их обработку не позднее 30 мин. с момента начала диагностической ситуации. Постоянная невозможность оперативной обработки инцидентов (в течение 30 мин.) говорит о необходимости пересмотра зоны мониторинга для данного рабочего места либо о повышенной доле недостатков диагностики на участке. Для каждого рабочего места инженера по мониторингу приказом начальника службы закреплена соответствующая зона мониторинга. ПО «Инциденты» настраивается на контролируемую зону инженером по мониторингу. Каждая диагностическая ситуация должна быть проанализирована либо инженером центра, либо инженером по мониторингу дистанции СЦБ. Для исключения одновременной работы с одним и тем же инцидентом программа предусматривает индикацию о взятии его в работу. Приступая к работе с инцидентами и при наличии очереди инцидентов инженер по мониторингу в первую очередь анализирует диагностические ситуации самой высокой степени важности. На степень важности влияют следующие факторы (указаны в порядке убывания влияния):

- влияние на безопасность движения;
 - возможное влияние на выполнение графика движения поездов;
 - массовость выявления диагностических ситуаций в пределах одного места;
 - проявление диагностической ситуации.
- Порядок работы показан на рис. 4.

Основной задачей анализа диагностической ситуации является классификация инцидента одним из типов:

1. Неисправность – диагностическая ситуация (группа ситуаций), возникшая в результате нарушения исправного состояния устройств ЖАТ либо при нарушении работниками транспорта организационно-распорядительных документов.

2. ТОиР – диагностическая ситуация, которая явилась следствием проведения работ на объекте.

3. Недостатки диагностики – диагностическая ситуация, которая возникла из-за несовершенства ПО или аппаратуры ДЦ, ДК, систем ТДМ (сбои, ошибки, некорректная работа алгоритмов). При этом устройства ЖАТ находятся в исправном состоянии.

4. Технологическая ситуация – диагностическая ситуация, не предусмотренная алгоритмами систем ТДМ и выявленная из-за сложившейся поездной обстановки, либо вызванная действиями дежурного по станции (ДСП) или поездного диспетчера (ДНЦ). При этом устрой-

ства ЖАТ находятся в исправном состоянии.

5. Выключенное устройство – диагностические ситуации, возникающие на объекте, выключенном из централизации [18].

Анализ диагностической ситуации начинается с оценки всего массива выявленных инцидентов (при его наличии) по месту в пределах рассматриваемого времени. Данный принцип позволяет еще до просмотра архива по инциденту объективно оценить сложившуюся ситуацию для принятия объективного решения по дальнейшему расследованию.

Наиболее важным этапом анализа диагностической ситуации является просмотр текущего и архивного состояния объекта, а также

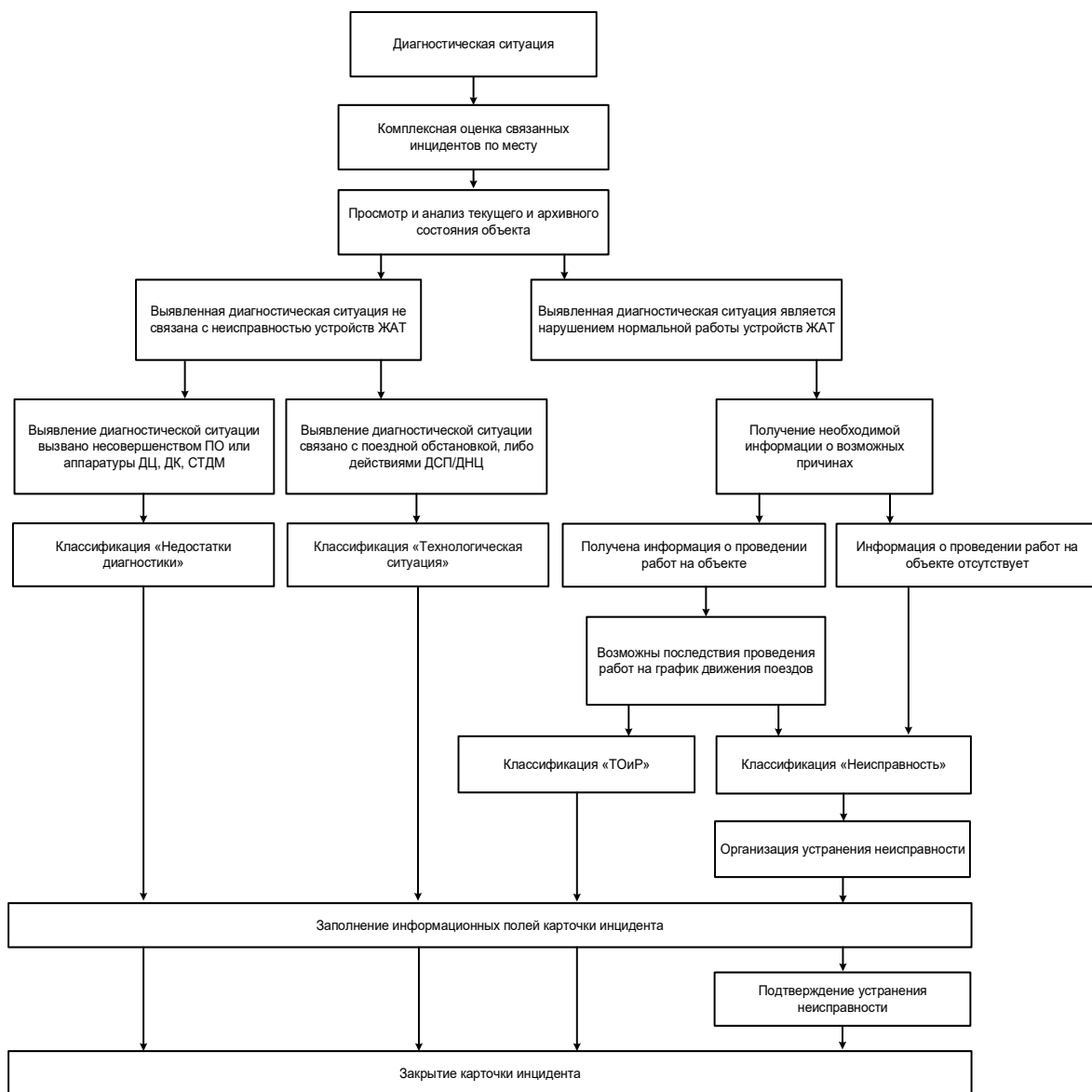


Рис. 4. Порядок работы с инцидентами
Fig. 4. Operating procedure with incidents

связанных с ним объектов. В зависимости от проявления диагностической ситуации и технической оснащённости объекта меняется объём анализируемой информации, поэтому для основных типов проявлений диагностических ситуаций должны быть разработаны операционные карты. Основными этапами анализа диагностической ситуации по текущему и архивному состоянию являются:

- просмотр и анализ текущего состояния объекта, объектов, связанных с ним и объектов, влияющих на его исправную работу;

- комплексная оценка схожих диагностических ситуаций, потенциально входящих в данный инцидент;

- просмотр и анализ архивного состояния объекта, объектов, связанных с ним, и объектов, влияющих на его исправную работу;

- анализ действий работника движения (ДСП, ДНЦ), возможно приведших к выявлению диагностической ситуации;

- анализ характера и тенденций изменения измеряемых параметров объекта и связанных с ним объектов;

- анализ поездного положения в момент выявления диагностической ситуации;

- анализ потенциально возможных задержек поездов и последствий диагностической ситуации на участке.

В случае если диагностическая ситуация не является следствием нарушения нормальной работы контролируемого объекта и устройства находятся в исправном состоянии, инцидент может быть классифицирован типом «Недостатки диагностики» либо «Технологическая ситуация». Общий принцип классификации инцидента как «Недостатки диагностики» заключается в наличии возможности предотвращения программными либо аппаратными средствами (на существующем этапе развития средств ТДМ) дальнейшего выявления аналогичной ситуации. Инциденты данного типа являются помехами в работе инженеров по мониторингу и требуют принятия мер по их недопущению. Инциденту присваивается тип «Технологическая ситуация», когда диагностическая ситуация является следствием нестандартной поездной обстановки либо действий ДСП / ДНЦ и существующими алгоритмами выявление данных ситуаций предотвращать нецелесообразно. Если инженер по мониторингу при анализе диагностической ситуации ви-

дит, что нарушено исправное состояние устройств ЖАТ, либо устройство работает в режиме, в котором не должно работать, он должен принять меры к выяснению причин ситуации. Основными методами получения необходимой информации по диагностической ситуации являются: телефонные переговоры с работниками службы движения (ДСП); телефонные переговоры с диспетчерским аппаратом (ШЧД, ПЧД, ЭЧЦ); телефонные переговоры с эксплуатационным штатом (ШН, ШНС); просмотр ГИД «Урал-ВНИИЖТ» или специализированных программ на предмет наличия окон; просмотр оперативных планов работ.

Достоверной полученную информацию о проведении работ на объекте можно считать, если она получена от непосредственного исполнителя, диспетчера ответственного подразделения или работника движения (ДСП). В данном случае инцидент должен быть классифицирован типом «ТОиР» при условии отсутствия влияния на график движения поездов. Если же проведение работ может вызвать задержки в движении поездов, инцидент классифицируется типом «Неисправность». Если информация о проведении работ на объекте отсутствует, инцидент классифицируется типом «Неисправность» и организуется его устранение согласно действующему регламенту взаимодействия при устранении неисправностей. Дополнительно должна быть проанализирована повторяемость данной неисправности. В случае выявления факта повторяемости эта информация должна быть использована для эскалации инцидента по действующему регламенту. С учетом того, что не всегда есть возможность оперативно установить факт проведения работ, с которыми связано выявление инцидента, допускается возможность изменения классификации инцидента с типа «Неисправность» на тип «ТОиР» в случае, если такая информация получена от непосредственного исполнителя, диспетчера ответственного подразделения или работника движения (ДСП) в течение 30 мин. после передачи сообщения об инциденте. Если такая информация поступила спустя 30 мин., ее нельзя считать достоверной, инцидент остается с типом «Неисправность», в комментарии указывается ФИО ответственного сотрудника, проводившего работы, и диспетчера, передавшего данную информацию.

При передаче информации о случившейся неисправности диспетчерскому аппарату (ШЧД,

ПЧД, ЭЦ, ЦУСИ-Ш, ЦУСИ-Э, ЦУСИ-П) инженер по мониторингу должен сообщить ему всю необходимую для расследования сопутствующую диагностической ситуации информацию, контролируруемую системой ТДМ на данном объекте. Инциденты, классифицированные типом «Неисправность», имеют наивысший приоритет в работе инженера, так как своевременное выявление отказов и предотказных состояний является основной целью проведения работы по управлению инцидентами. Инженер по мониторингу обязан предпринять все меры для идентификации всех возможных неисправностей на контролируемом участке [18].

По окончании расследования инженер по мониторингу заполняет информационные поля карточки инцидента и убеждается в присвоении инциденту статуса «Законченный». В случае необходимости оставления инцидента с другим статусом («Устраняется», «Разобранный», «Запланирован», «Принят») на неопределенный срок карточка должна быть закрыта от редактирования. В исключительных случаях при высокой интенсивности диагностических ситуаций в инциденте карточка может быть оставлена со статусом «Устраняется» без закрытия от редактирования, тогда инженер по мониторингу должен сделать запись о его причине и планируемой дате устранения в поле «Причина» карточки инцидента. В случае, если инцидент не будет устранен в течение смены, он должен быть передан по смене.

Инженер по мониторингу несет ответственность за информацию, указанную им в карточке инцидента. Данная информация должна быть получена из достоверного источника (непосредственного исполнителя, диспетчера ответственного подразделения или работника движения). Запрещается внесение в информационные поля карточки инцидента неподтвержденной фиктивной информации. Для инцидентов с типом «Неисправность» инженер по мониторингу в обязательном порядке заполняет следующие информационные поля карточки инцидента:

1. «Сообщено». Фиксируются линейные предприятия, должности или фамилии сотрудников, кому сообщено о неисправности.

2. «Ответственный». Выбирается служба, виновная в возникновении неисправности.

3. «Начало». Автоматически фиксируется дата и время классификации инцидента.

4. «Крайний срок». Автоматически заносится крайняя дата и время устранения инцидента в зависимости от его тревожности. При необходимости изменяется вручную.

5. «Причина». Выбирается причина неисправности из классификатора причин. В строку «Комментарий» вносится описание причины, фамилии и должности устранявших неисправность сотрудников и прочая необходимая информация. Классификатор причин должен быть раскрыт до максимально возможного уровня. Формулировка и объем комментария, указанного в причине инцидента должны быть достаточными для идентификации неисправного устройства и его месторасположения.

6. «Факт». Заносится дата и время окончания расследования инцидента.

Для инцидентов с типом «Неисправность» изменение статуса на «Законченный» означает фактическое устранение неисправности. Инженер по мониторингу должен подтвердить факт устранения неисправности и соответствие переданной причины характеру и проявлению диагностической ситуации всеми имеющимися у него способами: возвращение индикации объекта к исправному состоянию (к соответствующему режиму работы), соответствие графика измеряемого параметра установленным нормам. Для большинства устройств ЖАТ необходимо по архиву убедиться в переходе их в состояние, соответствующее проявлению диагностической ситуации (для стрелки – нормальный перевод, для светофора – открытие, для схемы смены направления – смена направления в основном режиме и т. д.).

Если в ходе проведенного анализа инженер по мониторингу устанавливает несоответствие переданной причины характеру и проявлению диагностической ситуации либо неисправность устранена не в полном объеме, он должен вернуть инцидент на дополнительное расследование. В этом случае данная информация сообщается диспетчеру ответственного подразделения и ЦУСИ-Ш. Для инцидентов с типом «Неисправность» обязательно объединение всех диагностических ситуаций, произошедших по одной и той же причине, в один инцидент. В этом случае заполнение полей «Место» и «Проявление» в автоматическом режиме может произойти некорректно. Инженер по мониторингу должен выбрать наиболее подходящие причине неисправности объект, место и проявление диа-

гностической ситуации. Инциденту, диагностические ситуации которого выявлены по устройству, выключенному из ЭЦ, можно присвоить тип «Выключенное устройство». Присвоение данного типа меняет статус инцидента на «Выключенный», все последующие диагностические ситуации по объекту будут формироваться в данный инцидент. Нахождение инцидента в статусе «Выполненный» означает наличие данных о выполнении соответствующего рабочего задания в системе ЕК АСУИ. После ознакомления с данными рабочего задания инженер по мониторингу должен подтвердить либо отклонить указанную причину [18].

Показатели работы с инцидентами

Применение описанных технологий мониторинга устройств и систем ЖАТ особенно актуально в границах Восточного полигона ОАО «РЖД». Восточный полигон включает в себя четыре железные дороги – Красноярскую, Восточно-Сибирскую, Забайкальскую и Дальневосточную. Эксплуатационная длина полигона составляет более 17 тыс. км. (1 042 железнодорожных станции и 1 087 перегонов). Мониторинг устройств ЖАТ Восточного полигона осуществляется при помощи целого ряда систем ТДМ: АПК-ДК «КИТ», АПК-ДК «ИМСАТ», АДК СЦБ, СТДС АПС и др. [22–24].

Из-за постоянной модернизации оборудования и увеличения количества станций, оборудованных системами ТДМ, с каждым годом есть значительный прирост в количестве инцидентов. К примеру, в 2020 г. среднее количество инцидентов в день по Восточно-Сибирской железной дороге составляло 2 000, а в 2021 г. это количество выросло на 15 % и со-

ставляло 2 300 (инц. / день). На основании анализа работы дорожных центров ТДМ Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской и Дальневосточной дорог за январь 2022 г. видно, что количество инцидентов, выявленных всеми системами мониторинга составило 514 696 шт. Обработано из них 501 770 или 97,4 %. Практически в полном объеме обработаны инциденты только на двух дорогах из четырех. На Восточно-Сибирскую железную дорогу в январе 2022 г. приходилось 67,1 % обработанных инцидентов [25].

Средняя интенсивность обработки инцидентов на железных дорогах Восточного полигона составила 53,08 инц. / чел.-ч. Аномальные значения данного показателя по Забайкальской и Дальневосточной дорогам. При этом показатель Красноярской и Восточно-Сибирской дорог значительно ниже среднего, что говорит о низкой интенсивности работы в центрах.

Заключение

Программное обеспечение (КЗ «Мониторинг, ПО «Инциденты, АСУ-Ш-2 и т. д.), используемое технологами и инженерами по мониторингу ЦТДМ достаточно разнообразно и требует от специалистов глубоких знаний как в вопросах работы с ПО, так и в вопросах эксплуатации и ремонта устройств и систем ЖАТ.

Загруженность инженеров мониторинга постоянно растет, из-за этого на Восточно-Сибирской железной дороге наблюдаются довольно низкие показатели работы ЦТДМ. Необходимо использовать доступные методы повышения эффективности работы, в данном случае можно применить специально разработанные алгоритмы работы программ мониторинга.

Список литературы

1. Шаманов В.И., Пулятьков А.В. Совершенствование системы технического обслуживания устройств автоматики // Автоматика, связь, информатика. 2008. № 12. С. 13–15.
2. Шерстюков О.С. Применение систем технической диагностики и мониторинга на железных дорогах России // Транспорт: наука, образование, производство (транспорт-2021) : тр. междунар. науч.-практ. конф. Воронеж. 2021. С. 247–251.
3. Пулятьков А.В., Сивакова Ю.А. Организация передачи и вывода данных удаленного контроля параметров устройств СЦБ // Молодая наука Сибири. 2020. № 3 (9). С. 95–101.
4. Федоров Н.В., Полежаев К.В. Развитие функционала систем ЖАТ и диагностики // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 1. С. 7–9.
5. Ефанов Д. В. Мониторинг сложных типовых объектов железнодорожной автоматики // Мир транспорта. 2018. Т. 16. № 4 (77). С. 74–86.
6. Вотолевский А.Л., Меньшиков Н.А. Проектирование дорожных центров мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. 2013. № 2 (6). С. 61–63.
7. Ефанов Д.В. Становление и перспективы развития систем функционального контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2. № 1. С. 124–148.

8. Пулятыков А.В., Алексеенко В.А., Лихота Р.В. Управление инцидентами в системе технической эксплуатации микропроцессорных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // *Транспорт Урала*. 2020. № 1 (64). С. 43–47.
9. Organizing operation of microprocessor devices of railway automation based on the incident management system / R.V. Likhota, A.V. Pul'tyakov, V.A. Alekseenko et al. // *Proceedings of the 6th International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway (ISMR)*. Beijing, 2018. Pp. 660–665.
10. Ефанов Д.В. Система мониторинга устройств железнодорожной автоматики на основе промышленного «Интернета вещей» // *Мир транспорта*. 2020. Т. 18. № 6 (91). С. 118–134.
11. Повышение качества эксплуатации микропроцессорных устройств / М.В. Белькевич, А.В. Пулятыков, В.А. Алексеенко и др. // *Автоматика, связь, информатика*. 2016. № 1. С. 24–27.
12. Бушуев С.В., Ускова М.Л., Попов А.Н. Оценка влияния систем технической диагностики и мониторинга на надежность работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики в эксплуатации // *Транспорт Урала*. 2014. № 3 (42). С. 68–72.
13. Панов А.А. Потенциал развития систем мониторинга // *Автоматика, связь, информатика*. 2021. № 1. С. 18–20.
14. Тарасова А.Е. К вопросу построения интеллектуальной информационной системы диагностики прогнозирования устройств ЖАТ // *Вестник современных исследований*. 2019. № 3.13 (30). С. 179–183.
15. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 март. 2019 г. № 466-р. // *Кодекс : сайт*. <https://docs.cntd.ru/document/553927831> (Дата обращения 22.10.2022).
16. Сапожников В.В., Лыков А.А., Ефанов Д.В. Понятие предотказного состояния // *Автоматика, связь, информатика*. 2011. № 12. С. 6–8.
17. Об утверждении Положения об учете, расследовании и анализе отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАНТ и положения об учете, расследовании и анализе технологических нарушений в перевозочном процессе на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАТ : распоряжение ОАО «РЖД» N 2160/р от 1 октября 2018 г. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
18. Стратегия управления инцидентами в хозяйстве автоматики и телемеханики : утв. распоряжением ЦДИ – филиала ОАО «РЖД» № ЦДИ-3778 от 12.09.2022 г. М. : ОАО «РЖД», 2022. 27 с.
19. Шевцов О.П., Карнаузов А.С., Антипкин В.А. Система ТДМ дает заметный результат // *Автоматика, связь, информатика*. 2021. № 1. С. 21–23.
20. Лукоянов Д.С. Роль ЦДМ в оптимизации технического обслуживания и ремонта устройств ЖАТ // *Автоматика, связь, информатика*. 2021. № 1. С. 10–14.
21. Шамов И.С. Средства диагностики – инструмент для снижения отказов // *Автоматика, связь, информатика*. 2021. № 1. С. 14–15.
22. Бородин А.Ф., Сторчак М.В. Научная оценка перспектив модернизации Восточного полигона сети Российских железных дорог // *Бюл. Объедин. ученого совета ОАО «РЖД»*. 2017. № 2. С. 65–73.
23. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации № 1734-р от 22.11.2008 г. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
24. Самуйлов В.М., Солохов В.Б. Транспортная стратегия развития Восточного полигона // *Инновационный транспорт*. 2021. № 1 (39). С. 16–19.
25. Анализ работы дорожных центров ТДМ в январь 2022 года : наряд-заказ № 137-2022/ОАТ от 22.02.2022 г. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.

References

1. Shamanov V.I., Pul'tyakov A.V. Sovershenstvovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya ustroystv avtomatiki [Improving the maintenance system for automation devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communications, Informatics], 2008, no. 12, pp. 13–15.
2. Sherstyukov O.S. Primenenie sistem tekhnicheskoi diagnostiki i monitoringa na zheleznykh dorogakh Rossii [Application of technical diagnostics and monitoring systems on Russian railways]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo (transport-2021)»* [Proceedings of the International Scientific-Practical Conference «Transport: science, education, production (transport-2021)»]. Voronezh, 2021, pp. 247–251.
3. Pul'tyakov A.V., Sivakova Yu.A. Organizatsiya peredachi i vyvoda dannykh udalennogo kontrolya parametrov ustroystv STSB [Organization of transmission and output of data for remote control of parameters of signaling devices]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2020, no. 3 (9), pp. 95–101.
4. Fedorov N.V., Polezhaev K.V. Razvitie funktsionala sistem ZHAT i diagnostiki [Development of the functionality of railway automation and telemechanics and diagnostic systems]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communications, Informatics], 2021, no. 1, pp. 7–9.
5. Efanov D.V. Monitoring slozhnykh tipovykh ob'ektov zheleznodorozhnoi avtomatiki [Monitoring of complex typical objects of railway automation]. *Mir transporta* [World of transport], 2018, vol. 16, no. 4 (77), pp. 74–86.
6. Votolevskii A.L., Men'shikov N.A. Proyektirovanie dorozhnykh tsentrov monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki [Design of road monitoring centers for railway automation and telemechanics devices]. *Nauka i*

transport. Modernizatsiya zhelezнодорожного транспорта [Science and transport. Modernization of railway transport], 2013, no. 2 (6), pp. 61–63.

7. Efanov D.V. Stanovlenie i perspektivy razvitiya sistem funktsional'nogo kontrolya i monitoringa ustroystv zhelezнодорожной автоматике i telemekhaniki [Formation and development prospects of systems of functional control and monitoring of railway automation and telemechanics devices]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], 2016, vol. 2, no. 1, pp. 124–148.

8. Pul'tyakov A.V., Alekseenko V.A., Likhota R.V. Upravlenie intsidentami v sisteme tekhnicheskoi ekspluatatsii mikroprotssessornykh ustroystv zhelezнодорожной автоматике i telemekhaniki [Incident management in the system of technical operation of microprocessor devices of railway automation and telemechanics]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2020, no. 1 (64), pp. 43–47.

9. Likhota R.V., Pul'tyakov A.V., Alekseenko V.A., Lontsikh P.A. Organizing operation of microprocessor devices of railway automation based on the incident management system. Proceedings of the 6th International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway (ISMR). Beijing, 2018, pp. 660–665.

10. Efanov, D. V. Sistema monitoringa ustroystv zhelezнодорожной автоматике na osnove promyshlennogo «Interneta veshchei» [Monitoring system for railway automation devices based on industrial "Internet of Things"]. *Mir transporta* [World of transport], 2020, vol. 18, no. 6 (91), pp. 118–134.

11. Bel'kevich M.V., Pul'tyakov A.V., Alekseenko V.A., Likhota R.V. Povyshenie kachestva ekspluatatsii mikroprotssessornykh ustroystv [Improving the quality of operation of microprocessor devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communications, Informatics], 2016, no. 1, pp. 24–27.

12. Bushuev S.V., Uskova M.L., Popov A.N. Otsenka vliyaniya sistem tekhnicheskoi diagnostiki i monitoringa na nadezhnost' raboty ustroystv zhelezнодорожной автоматике i telemekhaniki v ekspluatatsii [Evaluation of the impact of technical diagnostics and monitoring systems on the reliability of railway automation and remote control devices in operation]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2014, no. 3 (42), pp. 68–72.

13. Panov A.A. Potentsial razvitiya sistem monitoringa [Potential for the development of monitoring systems]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communications, Informatics], 2021, no. 1, pp. 18–20.

14. Tarasova A.E. K voprosu postroyeniya intellektual'noi informatsionnoi sistemy diagnostiki prognozirovaniya ustroystv ZHAT [On the issue of building an intelligent information system for diagnosing the prediction of devices of railway automation and telemechanics]. *Vestnik sovremennykh issledovaniy* [Bulletin of Modern Research], 2019, no. 3.13 (30), pp. 179–183.

15. Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Rossiiskie zheleznye dorogi» do 2025 goda: utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 19 marta 2019 g. № 466-r. [Long-term development program of the JSC «Russian Railways» until 2025: approved by the Decree of the Government of the Russian Federation no. 466-r dated March 19, 2019].

16. Sapozhnikov V.V., Lykov A.A., Efanov D.V. Ponyatie predotkaznogo sostoyaniya [The concept of pre-failure state]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communications, Informatics], 2011, no. 12, pp. 6–8.

17. Ob utverzhdenii Polozheniya ob uchete, rassledovaniy i analize otkazov v rabote tekhnicheskikh sredstv na infrastrukture OAO «RZhD» s ispol'zovaniem avtomatizirovannoi sistemy KASANT i polozheniya ob uchete, rassledovaniy i analize tekhnologicheskikh narusheniy v perevozochnom protsesse na infrastrukture OAO «RZhD» s ispol'zovaniem avtomatizirovannoi sistemy KASAT: rasporyazhenie OAO «RZhD» No. 2160/r ot 1 oktyabrya 2018 g [On approval of the Regulations on accounting, investigation and analysis of failures in the operation of technical means on the infrastructure of JSC «Russian Railways» using the automated system KASANT and regulations on accounting, investigation and analysis of technological violations in the transportation process on the infrastructure of JSC «Russian Railways» using the automated system KASAT: order of JSC «Russian Railways» no. 2160/p dated October 1, 2018].

18. Strategiya upravleniya intsidentami v khozyaistve avtomatiki i telemekhaniki: utv. rasporyazheniem TSDI – filiala OAO «RZHD» № TSDI-3778 ot 12.09.2022 g. [Incident management strategy in the economy of automation and telemechanics: approved by order of central directorate of infrastructure – a branch of JSC «Russian Railways» no. TSDI-3778 dated September 12, 2022]. Moscow: RZHD Publ., 2022. 27 p.

19. Shevtsov O.V., Karnaukhov A.S., Antipkin V.A. Sistema TDM daet zametnyi rezul'tat [The technical diagnostics and monitoring system gives excellent result]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communications, Informatics], 2021, no. 1, pp. 21–23.

20. Lukoyanov D.S. Rol' TSDM v optimizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta ustroystv ZHAT [The role of the centers of diagnostic and monitoring in optimizing the maintenance and repair of railway automation and telemechanics devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communications, Informatics], 2021, no. 1, pp. 10–14.

21. Shamov I.S. Sredstva diagnostiki – instrument dlya snizheniya otkazov [Diagnostic tools – a tool for reducing failures]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communications, Informatics], 2021, no. 1, pp. 14–15.

22. Borodin A.F., Storchak M.V. Nauchnaya otsenka perspektiv modernizatsii Vostochnogo poligona seti Rossiiskikh zheleznykh dorog [Scientific assessment of the prospects for the modernization of the Eastern range of the Russian railway network]. *Byulleten' Ob'edinennogo uchenogo soveta OAO «RZHD»* [Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways], 2017, no. 2, pp. 65 – 73.

23. Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda: utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Ros. Federatsii № 1734-r ot 22.11.2008 g [Transport Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030: approved by the decree of the Government of the Russian Federation. Federation No. 1734-r dated November 22, 2008].

24. Samuilov V.M., Solokhov V.B. Transportnaya strategiya razvitiya Vostochnogo poligona [Transport strategy for the development of the Eastern polygon]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2021, no. 1 (39), pp. 16–19.

25. Analiz raboty dorozhnykh tsentrov TDM v yanvar' 2022 goda: naryad-zakaz № 137-2022/OAT ot «22» fevralya 2022 goda [Analysis of the work of the road centers of diagnostic and monitoring in January 2022: work order no. 137-2022/OAT dated February 22, 2022.].

Информация об авторах

Пультяков Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации, телемеханики и связи, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: pul'tyakov@irgups.ru.
Алексеенко Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации, телемеханики и связи, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: bezvopros03@mail.ru.

Information about the authors

Andrei V. Pul'tyakov, Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation, Remote Control and Communication, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: pul'tyakov@irgups.ru.
Vladimir A. Alekseenko, Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Automation, Remote Control and Communication, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: bezvopros03@mail.ru.

Эластичные полиуретановые амортизаторы

Н.А. Ефимов✉, А.С. Тычков

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, Российская Федерация

✉efimov.nikolai@mail.ru

Резюме

В статье представлены результаты комплексных исследований жесткостных, деформационно-силовых характеристик и гистерезисных потерь эластичных амортизаторов и разработки новых технических устройств, повышающих надежность и долговечность узлов и деталей ходовой части рельсовых транспортных средств. Численные исследования проводились в программном комплексе ANSYS с набором продуктов Multiphysics методом конечных элементов с использованием полиномиальной модели гиперупругого материала Муни – Ривлина. Проведены экспериментальные исследования по определению зависимости жесткости торообразных эластичных блоков от осевой деформации сжатия и их гистерезисных потерь при рабочей нагрузке. На основании полученных результатов построены графические зависимости жесткости торообразных эластичных элементов с различным поперечным сечением, выполненных из полиуретана марки SKU-7Л от осевой деформации сжатия. Они свидетельствуют, что жесткость амортизаторов с круглым поперечным сечением при увеличении нагрузки и деформировании до 40 %, допустимой для эластомеров, круто возрастает и позволяет обеспечить нормативные перемещения конструктивных элементов подвижного состава и улучшенные динамические свойства. Для расчета жесткости амортизаторов торообразной формы в зависимости от их осевой деформации выведена формула. Получены эпюры эквивалентных напряжений по Мизесу и построены деформационно-силовые характеристики рассматриваемых эластичных амортизаторов. Установлено, что коэффициент механических потерь с уменьшением коэффициента формы амортизаторов и их твердости снижается и находится в интервале 0,15–0,45. Для совершенствования конструкции и оптимизации параметров подвижного состава обоснованы и рекомендованы к внедрению универсальные полиуретановые амортизаторы торообразной формы.

Ключевые слова

эластичный полиуретановый амортизатор, торообразный эластичный блок, жесткость, гистерезисные потери, программный комплекс ANSYS, деформационно-силовые характеристики

Для цитирования

Ефимов Н.А. Эластичные полиуретановые амортизаторы / Н.А. Ефимов, А.С. Тычков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 206–214. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).206-214.

Информация о статье

поступила в редакцию: 3.11.2022 г.; поступила после рецензирования: 26.12. 2022 г.; принята к публикации: 27.12. 2022 г.

Elastic polyurethane shock absorbers

N.A. Efimov✉, A.S. Tychkov

Samara State Transport University, Samara, the Russian Federation

✉efimov.nikolai@mail.ru

Abstract

Comprehensive studies of stiffness, deformation-force characteristics and hysteresis losses of elastic shock absorbers and the development of new technical devices that increase the reliability and durability of components and chassis parts of rail vehicles have been carried out. Numerical studies were carried out in the ANSYS software package with a set of Multiphysics products by the finite element method using the Mooney-Rivlin polynomial hyper elastic material model. Experimental studies of the dependence of torus-shaped elastic blocks stiffness on axial compression deformation and the determination of their hysteresis losses under workload have been carried out. Based on the research results, graphical dependences of the stiffness of torus-shaped elastic elements with different cross-sections made of the SKU-7L brand polyurethane on axial compression deformation are constructed. They indicate that the rigidity of shock absorbers with a circular cross-section increases steeply with an increase in load and deformation up to 40 % of permissible for elastomers, and allows for normative movements of structural elements of rolling stock and improved dynamic properties. To calculate the stiffness of torus-shaped shock absorbers, depending on their axial deformation, the formula is derived. Diagrams of equivalent stresses according to Mises are obtained and the deformation-force characteristics of the elastic shock absorbers under consideration are constructed. It is established that the coefficient of mechanical losses decreases with a decrease in the coefficient of the shape of shock absorbers and their hardness and is in the range of 0.15 – 0.45. To improve the design and optimize the parameters of the rolling stock, universal torus-shaped polyurethane shock absorbers have been developed and recommended for implementation.

Keywords

elastic polyurethane shock absorber, torus-shaped elastic block, stiffness, hysteresis losses, software package ANSYS, deformation and force characteristics

For citation

Efimov N.A., Tychkov A.S. Elastichnye poliuretanyovye amortizatory [Elastic polyurethane shock absorbers]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 196–204. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).196-204.

Article info

Received: November 3, 2022; Revised: December 26, 2022; Accepted: December 27, 2022.

Введение

В настоящее время в связи с ростом скоростей движения подвижного состава и сопутствующих этому механических колебаний для предотвращения негативных последствий их действия на работу механических устройств, высокоточной техники и аппаратуры, а также предупреждения их отказов необходимы системы эффективной виброзащиты.

При этом конструкция и характеристики системы подвешивания элементов ходовой части оказывают существенное влияние на критерии эффективности работы подвижного состава. От компоновки элементов системы подвешивания, которые относятся к группе оборудования, подверженному значительному износу, зависят также такие параметры, как тяговые и тормозные силы, характеристики динамической нагрузки конструктивных узлов подвижного состава, устойчивость и безопасность движения, влияющие на эффективность режимов работы.

Для регулирования колебательных движений кузова транспортного средства, снижения ударных нагрузок, их равномерного распределения и выдержки нормативных значений при тяговых режимах движения по наземному пути с различными неровностями и торможения на подвижном составе в системе подвешивания применяются различные амортизаторы, баллоны, единичные и многоцепные упругие пружинные опоры. Данная колебательная система при эксплуатации испытывает различные инерционные динамические возмущающие усилия. Как в России, так и в зарубежных странах для их амортизации широко применяют резинометаллические (т.е. эластичные) сверхупругие блоки [1]. Сказанное свидетельствует о необходимости и потребности исследований по применению эластомеров для улучшения динамических качеств подвижного состава. Учет особенностей динамических характеристик эластичных блоков позволяет нам работать над их последующим совершенствованием для решения задач эффективной эксплуатации и использования транспортных средств.

Эксплуатация транспортных средств показала, что очень успешным способом снижения динамических нагрузок в системе подвески механической части является приемлемое снижение жесткости упругих связей. В то же время невозможно уменьшить значения жесткости упругих механических элементов без снижения их прочностных характеристик, определяющих высокую долговечность. Наивысшая долговечность эластичных пружин реализуется при выполнении главных условий:

- относительные рабочие деформации сжатия должны быть не более 15–20 %, а сдвига – 30 %;
- максимальное рабочее напряжение не более 1,5 МПа.

К тому же упруго-диссипативные характеристики упругих связей сильно влияют на износ колес и других конструктивных элементов различного подвижного состава.

Особенностями эластомерных металлических блоков (ЭМБ) являются:

- способность испытывать высокие упругие деформации с довольно большой относительной энергетической емкостью;
- высокая надежность виброзащиты оборудования и аппаратуры;
- высокая агрессивная стойкость.

Можно отметить, что современная промышленность обладает высокой технологичностью массового производства ЭМБ, а результаты лабораторных исследований доказали положительное влияние на динамику подвижного состава нелинейной силовой характеристики упругих эластичных амортизирующих устройств, составляющих конструкцию подвижного состава [2, 3]. Основные механические параметры ЭМБ – жесткость конструкции и коэффициент упруговязкого сопротивления – определяются в процессе изменения конструктивных размеров и характеристик материала. При практической реализации необходимо определить оптимальные геометрические размеры разрабатываемых эластичных элементов в соответствии с определенными расчетными упругими

характеристиками. В основном демпфирующие материалы представляют собой полимеры (высокомолекулярные соединения), обладающие высокоэластичными свойствами и вязкостью, подобранный состав которых обеспечивает высокие демпфирующие свойства для определенного частотного и температурного интервала. К эластомерам относятся каучуки, резины, полиуретаны и термоэластопласты, применяемые в современных технических устройствах [4].

Исходя из сказанного, целью настоящей статьи является проведение комплексных исследований по определению жесткостных и силовых характеристик эластичных амортизаторов различных конструктивных размеров из полиуретана марки СКУ-7Л и их гистерезисных потерь.

Литературный обзор

На современном этапе развития резину все больше заменяют полиуретаном благодаря таким его отличительным свойствам, как износостойкость, достаточная стойкость к агрессивным средам, диэлектрическим свойствам и способности эксплуатироваться при достаточно высоком уровне давления (порядка 120 МПа) в большом температурном интервале (от -60° до 150°C).

Одним из распространенных марок полиуретана являются литьевые СКУ-7Л и СКУ-ПФЛ-100, которые преобладают над другими, благодаря более высоким физико-механическим свойствам. При всем этом полиуретан обладает гистерезисным демпфированием [5], оказывающим влияние на динамические свойства подвижного состава, что следует рассматривать и учитывать для обеспечения требуемой плавности хода.

Значительный интерес представляет использование указанных полиуретанов в производстве деталей с повышенной вибростойкостью, а также в уплотнительной технике и кузнечно-штамповом производстве [6]. Полиуретан успешно заменяет резину различных марок и даже металлы, благодаря своим известным исключительным свойствам.

Значение коэффициента демпфирования рассчитывается по энпоре петли гистерезиса как отношение работы амортизации при нагрузочно-разгрузочном цикле к работе упругой деформации. Площадь между нагрузочными и разгрузочными графиками характеризует петлю гистерезиса.

Диаграмма нагружения эластомера для полного периода имеет эллипсоидную форму (рис. 1).

В механических системах величина амортизации оценивается при помощи коэффициента поглощения энергии Ψ , причем для линейной одномассовой модели – это отношение энергии, вызванной гармоническими колебаниями, подлежащей рассеянию за один цикл колебаний к самому высокому значению первоначальной потенциальной энергии [7].



Рис 1. Гистерезисная кривая эластичного амортизатора

Fig. 1. Hysteresis curve of elastic shock absorber

Полная энергия амортизирующей системы W уменьшается за цикл колебаний на значение ΔW , которое отражает энергию вязкоупругой работы сил сопротивления – неупругих сил. Коэффициент поглощения $\Psi = \Delta W/W$ характеризует степень рассеяния полной энергии системы, и он подобен коэффициенту полезного действия.

Известны результаты испытаний полиуретана СКУ-ПФЛ-100, имеющего твердость 92–98 ед. по Шору А, и разработана математическая модель для интервала деформаций 0–30 % при различных скоростях деформирования. Анализ работы систем конструктивной амортизации применяет физическую установку того, что в амортизаторах сухого трения их диссипация и упругость не зависят от скорости деформирования. Это дает возможность изучать их параметры в режиме статической нагрузки. Зависимость циклической нагрузки амортизатора в статическом режиме представляет собой петлю гистерезиса, отражающую данные о его упругих и рассеивающих характеристиках». Данные экспериментальные исследования проводились над цилиндрическими

полиуретановыми образцами с коэффициентом формы $\Phi = 1,6$, т. е. отношением высоты к диаметру. Расчет величины удельной рассеянной энергии выполнялся для каждого цикла. Площадь петли гистерезиса оценивались потери энергии в единице объема за один цикл колебаний. Коэффициент механических потерь (КМП), т. е. относительный гистерезис, лежит в пределах 0,2–0,53 [8].

Для улучшения динамики ходовой части подвижного состава было разработано устройство шарнирного поводка буксового узла [9], которое позволяет повысить надежность поводков буксовых узлов посредством снижения нагрузок в механизме радиальной установки осей колесных пар при уменьшении осевой и радиальной жесткостей составляющих ЭМБ и ограничении рабочей деформации их торцов, что способствует снижению возникающих направляющих усилий и в итоге помогает уменьшить износ гребней бандажей колесных пар.

Практика показывает, что повышение качества механической части подвижного состава обеспечивается применением универсального торообразного эластичного амортизатора «модуля Дергачевых» – ЭЭ ИВП-ЭД [10, 11]. Предлагается для внедрения аналогичный эластичный амортизатор с круглым поперечным сечением (рис. 2), обладающий плавно возрастающей жесткостью при увеличении сжимающей нагрузки [12]. Для обоснования этого выполнены численные и экспериментальные исследования напряжено-деформированного состояния рассматриваемого торообразного амортизатора из полиуретана для определения его оптимальной геометрии, обеспечивающей жесткостную характеристику, исключающую возникновение недопустимых деформаций, и рассчитаны силовые характеристики.

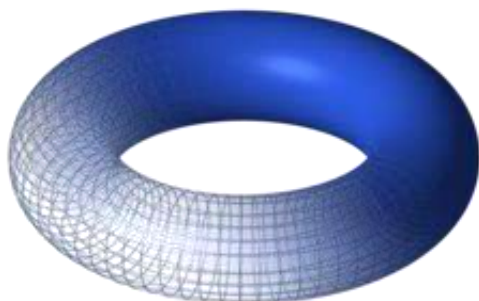


Рис. 2. Универсальный торообразный амортизатор из эластомера

Fig. 2. Universal torus elastomer shock absorber

Численные исследования проводились в программном комплексе ANSYS с набором продуктов Multiphysics методом конечных элементов с использованием полиномиальной модели гиперупругого материала Муни – Ривлина. Составлены модели торообразных амортизаторов с образующей геометрической фигурой формы круга, вертикальных и наклонных эллипсов с эксцентриситетом 0,48–0,87. Для равнозначности всех рассматриваемых амортизаторов при выполнении расчетов выбиралось одинаковое значение площади их поперечных сечений [13].

Материалы и методы

При моделировании поведения эластомеров брались следующие целевые составляющие:

- показатели, характеризующие вязкоупругие свойства и деформации;
- объемная сжимаемость;
- возникающий саморазогрев;
- трехмерный характер деформирования.

Дополнительно рассматривается демпфирование колебаний посредством программы ANSYS для модального и гармонического анализа [14].

При исследованиях применялась модель материала Муни – Ривлина, полиномиальная модель гиперупругого эластичного материала [15]. В этой модели функция плотности энергии деформации имеет форму полинома от двух инвариантов I_1, I_2 .

Величина упругого потенциала для двухконстантного материала Муни – Ривлина определяется выражением:

$$W = C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + D_1(J - 1)^2,$$

где W – потенциал энергии деформаций; I_1, I_2 – инварианты девиатора деформаций; C_{01}, C_{10} – константы материала; $D_1 = 1/d$, d – материальный параметр несжимаемости; J – определитель градиента деформации.

Для реальных материалов энергия рассеивается при деформации – разновидность внутреннего трения. С целью определения параметров амортизации используется модель, базирующаяся на коэффициенте гистерезисных потерь, так как потери энергии за период практически не определяются величиной частоты и амплитуды. Опытные предварительные расчеты показали, что коэффициенты гистерезисных потерь имеют довольно большие расхождения, в зави-

симости от композиционного состава материала. Исследуемые эластичные амортизаторы – торообразные ЭМБ с образующей геометрической фигурой формы круга диаметром d , вертикальных и наклонных эллипсов с полуосями a и b , ограниченные сверху и снизу опорами. Верхняя опора под действием нагрузки P выполняет пошаговые осевые перемещения, деформируя амортизатор, а нижняя опора жестко закреплена. Предварительно задаются характеристики материалов: торообразные амортизаторы из полиуретана марки СКУ-7Л, модуль упругости $E_1 = 10$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,499$; опоры из углеродистой стали, модуль упругости $E_2 = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_2 = 0,3$ и жесткое контактное сцепление амортизатора с опорами. Конечно-элементная расчетная модель торообразных ЭМБ представлена на рис. 3.

Двухмерная упругая статическая нелинейная задача решалась в осесимметричной постановке. Использовался восьмиузловой двухмерный упругий конечный элемент объемного напряженно-деформированного состояния (НДС) SOLID 183 с выбранной толщиной TNK [16] с выставлением контактных точек, моделированием крепления и перемещением подвижных элементов модели.

Результаты

Результаты исследований НДС амортизаторов в форме круга показали возрастание их жесткости с увеличением нагрузки и деформирования от 35 до 40 %, что дает возможность гарантировать допустимые смещения составных конструктивных элементов подвижного состава, улучшенные динамические свойства, высокий ресурс и надежность данных амортизирующих устройств.

Графические зависимости жесткости исследуемых ЭМБ от осевой деформации сжатия представлены на рис. 4.

По жесткостным характеристикам определяются деформационно-силовые характеристики эластичных амортизаторов.

Схема деформации торообразного эластичного амортизатора с образующей геометрической фигурой формы круга показана на рис. 5.

Для инженерных расчетов жесткости торообразного эластичного амортизатора в зависимости от осевой деформации сжатия (см. рис. 5), принимая его несжимаемым, выведена формула:

$$C = \frac{ES}{d - \Delta d} = \frac{E\pi D_{AV} b}{d - \Delta d} = \frac{E\pi D_{AV} \sin[\arccos(1 - \bar{\Delta d})] \cdot (1 + \bar{\Delta d})}{(1 - \bar{\Delta d})} \quad (1)$$

где S – площадь кольца контакта торообразного амортизатора, m^2 ; E – модуль упругости эластомера, МПа; $D_{AV} = (D_o + D_i) / 2$ – средний диаметр тора, м; $b = a + \Delta a = a \cdot (1 + \bar{\Delta d})$ – толщина кольца контакта амортизатора при нагружении; a – хорда деформированного круглого поперечного сечения амортизатора, м; d – диаметр образующей окружности тора, м; Δd – осевая деформация сжатия, м; $\bar{\Delta d} = \Delta d / d$ – относительная осевая деформация сжатия; $[\arccos(1 - \bar{\Delta d})] = \alpha / 2$ – половина угла сектора образующей окружности тора при осевом сжатии.

Растекание торообразного амортизатора при нагружении, сопровождающееся увеличением площади кольца контакта, принимается равным величине его относительной осевой деформации сжатия.

Для установления адекватности данной формулы были проведены экспериментальные

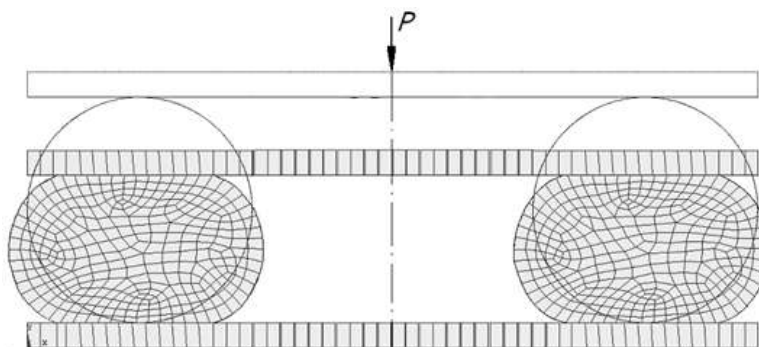


Рис. 3. Конечно-элементная модель расчета торообразных эластомерных металлических блоков

Fig. 3. Finite element model for calculation of toroidal elastomeric metal blocks

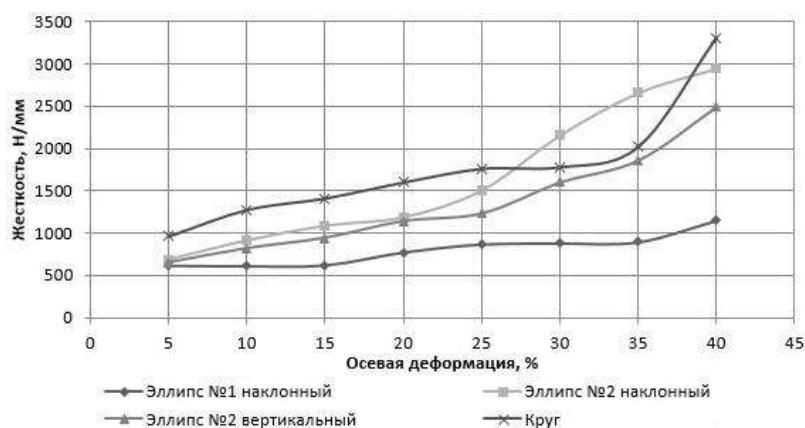


Рис. 4. Характеристики жесткости торообразных эластичных амортизаторов
 Fig. 4. Rigidity Characteristics of Toroidal Elastic Shock Absorbers

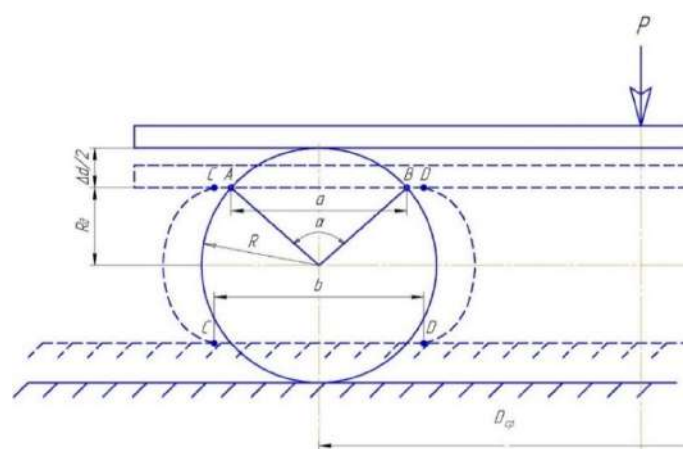


Рис. 5. Схема деформации торообразного эластичного амортизатора
 Fig. 5. Scheme of deformation of a toroidal elastic shock absorber

исследования зависимости жесткости торообразных эластичных амортизаторов от осевой деформации сжатия. В исследованиях применялся лабораторный стенд, включающий в себя, в частности, малогабаритный винтовой пресс и электронный динамометр.

Сравнение результатов экспериментальных исследований, лежащих в пределах 90 % доверительного интервала, с расчетными данными по формуле (1) показало удовлетворительную сходимость (6–11 %). Данную формулу можно «рекомендовать для практического применения при проектировании и внедрении эластичных универсальных торообразных амортизаторов для эффективности и эксплуатационной надежности подвижного состава» [13].

В дополнение ко всему были проведены экспериментальные исследования циклического сжатия цилиндрических несшитых образцов из полиуретана марки СКУ-7Л твер-

достью 76–85 ед. по Шору А и определены осредненные гистерезисные потери. Испытаниям подвергались образцы-амортизаторы с коэффициентом формы $\Phi = 1-0,06$, которые сжимались до деформации 25 %. Эти данные, осредненные для нескольких десятков образцов, имеют примерно 30 %-ный доверительный интервал при 90 %-ной надежности и вполне применимы для инженерных расчетов при твердости полиуретана до 80 ед. по Шору А. Более высокая твердость приводит к заметному увеличению петли гистерезиса. При твердости более 90 ед. по Шору А усилие разгрузки приближается к нулю. Коэффициенты механических потерь определялись расчетом по масштабной шкале площадей петель гистерезиса. На рис. 6 приведена типовая гистерезисная кривая циклического сжатия шайб из полиуретана СКУ-7Л твердостью 76–85 ед. по Шору А [5].

Систематизация данных по результатам изысканий говорит о том, что величина коэффициента механических потерь при снижении коэффициента формы образцов и твердости полиуретана уменьшается и лежит в интервале $KMP = 0,15–0,45$, что необходимо учитывать при разработке и проектировании рекомендуемых амортизаторов из полиуретана SKU-7Л.

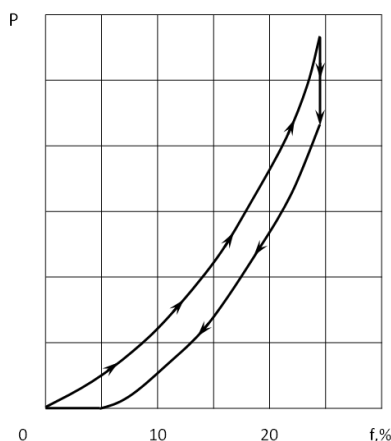


Рис. 6. Типовая гистерезисная кривая сжатия шайб из полиуретана SKU-7Л твердостью 76–85 ед. по Шору А

Fig .6. Typical hysteresis compression curve of polyurethane washers SKU-7L with hardness of 76–85 units according to Shore A

Обсуждение

В результате численных исследований получены эпюры эквивалентных напряжений по Мизесу, жесткостные и деформационно-силовые характеристики рассматриваемых амортизаторов. В качестве примера на рис. 7 показаны эк-

вивалентные напряжения по Мизесу в расчетных сечениях эластичных полиуретановых торобразных амортизаторов в плосконапряженном деформированном состоянии при одинаковом осевом статическом сжатии – DMX: a – низкий коэффициент контактного трения $k_{тр} = 0,15$ при сухих плоских поверхностях опорных плит, контактирующих с амортизатором; b – высокий коэффициент контактного трения $k_{тр} = 0,5$ при наличии насечки на контактирующих с амортизатором поверхностях опорных плит.

По текстовой части рисунка можно отметить, что максимальные эквивалентные напряжения – SMX при одинаковом осевом перемещении сжатия – DMX возникают при высоком коэффициенте контактного трения опорных плит и эластичного амортизатора, воспринимающего безопасно более высокую силовую нагрузку, что подтверждается результатами ранее проведенных экспериментальных исследований с использованием метода композиционного рототабельного планирования экспериментов [1, 17]. На рис. 8 представлены деформационно-силовые характеристики эластичных цилиндрических амортизаторов диаметром 120 мм с коэффициентом формы $\Phi = 0,05; 0,1$ из полиуретана марки SKU-7Л твердостью 85 ед. по Шору А при сухих плоских поверхностях опорных плит [1].

По анализу результатов экспериментальных исследований делается вывод, что они лежат в пределах 90 % доверительного интервала, и констатируется удовлетворительная сходимость [16–19].



Рис. 7. Эквивалентные напряжения по Мизесу при осевом статическом сжатии эластичного амортизатора:

$a - k_{тр} = 0,15; b - k_{тр} = 0,6$

Fig. 7. Equivalent stresses according to Mises during axial static compression of an elastic shock absorber:

$a - k_{тр} = 0,15; b - k_{тр} = 0,6$

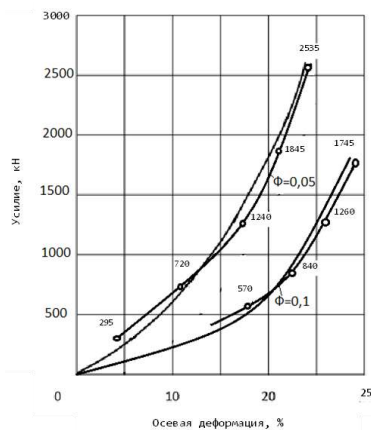


Рис. 8. Деформационно-силовые характеристики эластичных цилиндрических амортизаторов диаметром 120 мм из полиуретана марки SKU-7Л твердостью 85 ед. по Шору А:

○-○-○-○- экспериментальные значения; — значения численных исследований

Fig. 8. Deformation-force characteristics of elastic cylindrical shock absorbers with a diameter of 120 mm polyurethane brand SKU-7L with a hardness of 85 units according to Shore A:

○-○-○-○- experimental values; — Numerical Research Values

Заключение

По результатам проведенных численных и экспериментальных исследований получены жесткостные и деформационно-силовые характеристики торообразных и цилиндрических эластичных амортизаторов из полиуретана марки SKU-7Л, обоснованы и рекомендованы к внедрению универсальные полиуретановые торообразные амортизаторы с круглым поперечным сечением для совершенствования конструкции и оптимизации параметров подвижного состава.

Список литературы

1. Синильщиков В.Б., Мелихов К.В., Кунавич С.А. Анализ работы арочного эластомерного амортизатора при сложном нагружении // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. 2021. № 12. С. 73–82.
2. Дергачев Э.П., Дергачев Э.Э. Повышение надежности тележки пассажирского вагона // Железнодорожный транспорт. 2002. № 10. С. 49–50.
3. Виброзащита оборудования летательных аппаратов / Г.С. Аверьянов, В.Н. Бельков, А.А. Перчун и др. // Самолетостроение России. Проблемы и перспективы : материалы симпозиума с междунар. участием. Самара, 2012. С. 19–21.
4. Chakraborty V.C., Ratna D. Polymers for Vibration Damping Applications. Elsevier Science, 2020. 348 p.
5. Моисеев В.К. Совершенствование технологии изготовления трубчатых и полых деталей летательных аппаратов эластичным инструментом с управляемым формоизменением : автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. Самара, 2006. 31 с.
6. Результаты ограниченного изгиба криволинейных кромок листовых деталей эластомером / В.К. Моисеев, А.А. Шаров, Е.Г. Громова и др. // Ключевые инженерные материалы. 2017. Т. 746. С. 285–289.
7. ГОСТ 24346–80. Вибрация. Термины и определения. Введ. 1981–01–01. М. : Изд-во стандартов, 1980. 26 с.
8. Белкин А.Е., Дагжиев И.З., Лонкин Б.В. Моделирование вязкоупругости полиуретана при умеренно высоких скоростях деформирования // Математическое моделирование и численные методы. 2014. № 3. С. 39–54.
9. Пат. 77593 Рос. Федерация. Поводок буксы / Н.А. Ефимов, Д.Е. Кочетков. № 2008121505/22 ; заявл. 27.05.2008 ; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 30. 1 с.
10. Прозоров Ю. Все началось с изобретения // Наука и жизнь. 2008. № 8. С. 42.
11. Дергачев Э.П., Дергачев Э.Э. Снижение динамической нагруженности подвагонного оборудования // Железнодорожный транспорт. 2005. № 10. С. 60–62.
12. Ефимов Н.А., Андрончев И.К., Ефимов И.Н. Численные исследования жесткости перспективных амортизирующих устройств ходовых частей подвижного состава железных дорог // Вестн. трансп. Поволжья. 2011. № 3 (27). С. 9–14.
13. Ефимов Н.А., Альмуханов А.А., Ефимов И.Н. Определение жесткости эластичного торообразного амортизатора // Вестн. трансп. Поволжья. 2012. № 5 (35). С. 43–49.
14. Rivlin R.S., Saunders D.W. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials VII. Experiments on the Deformation of Rubber // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1951. Vol. 243 (865). Pp. 251–288.
15. ANSYS 2019 R1 – Расчетные возможности. М. : КАДФЕМ Си-Ай-Эс, 2019. 142 с.
16. Finite Element Method Study of the Protection Damping Elements Dynamic Deformation / A.V. Demareva, A.I. Kibets, M.V. Skobeeva et al. // Advanced Structured Materials. 2021. Vol. 137. Pp. 57–66.
17. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. М. : Юрайт, 2019. 495 с.
18. Анисимов В.Н., Литвинов В.Л. Анализ влияния движения границ при исследовании резонансных свойств систем с демпфированием // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Физико-математические науки. 2009. № 2 (19). С. 147–152.

19. Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов / В.А. Барвинок, А.Н. Кирилин, А.Д. Комаров и др. М. : Наука и технологии, 2002. 394 с.

References

1. Sinil'shchikov V.B., Melekhov K.V., Kunavich S.A. Analiz raboty arochnogo elastomernogo amortizatora pri slozhnom nagruzhennii [Analysis of the work of an arched elastomeric shock absorber under complex loading]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Bulletins of high educational organizations. Mechanical Engineering], 2021, no. 12, pp. 73–82.
2. Dergachev E.P., Dergachev E.E. Povyshenie nadezhnosti telezhki passazhirskogo vagona [Improving the reliability of a passenger car trolley]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway Transport], 2002, no. 10, pp. 49–50.
3. Averyanov G.S., Bel'kov V.N., Perchun A.A., Balashov V.S., Khamitov R.N. Vibrozashchita oborudovaniya letatel'nykh apparatov [Vibration protection of aircraft equipment]. *Materialy simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem «Samoletostroenie Rossii. Problemy i perspektivy»* [Proceedings of the symposium with international participation «Aircraft construction of Russia. Problems and prospects»]. Samara, 2012, pp. 19–21.
4. Chakraborty B.C., Ratna D. *Polymers for Vibration Damping Applications*. Elsevier Science, 2020. 348 p.
5. Moiseev V.K. Sovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniya trubchatykh i polykh detalei letatel'nykh apparatov elastichnym instrumentom s upravlyaemym formoizmeneniem [Improving the technology of manufacturing tubular and hollow parts of aircraft with an elastic tool with controlled shape change]. Doctor's thesis. Samara, 2006. 31 p.
6. Moiseev V.K., Sharov A.A., Gromova E.G., Manturov M.N. Rezul'taty ogranichennogo izgiba krivolineinykh kromok listovykh detalei elastomerom [Results of limited bending of curved edges of sheet parts by elastomer]. *Klyuchevye inzhenernye materialy* [Key engineering materials], 2017, vol. 746, pp. 285–289.
7. GOST 24346-80. Vibratsiya. Terminy i opredeleniya [State Standard 24346-80. Vibration. Terms and definitions]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1980. 26 p.
8. Belkin A.E., Dashtiev I.Z., Lonkin B.V. Modelirovanie vyazkoupugosti poliuretana pri umerenno vysokikh skorostyakh deformirovaniya [Modeling of viscoelasticity of polyurethane at moderately high deformation rates]. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody* [Mathematical Modeling and Numerical Methods], 2014, no. 3, pp. 39–54.
9. Efimov N.A., Kochetkov D.E. Patent RU 77593 U1, 27.10.2008.
10. Prozorov Yu. Vse nachalos' s izobreteniya [It all started with an invention]. *Nauka i zhizn'* [Science and Life], 2008, no. 8, pp. 42.
11. Dergachev E.P., Dergachev E.E. Snizhenie dinamicheskoi nagruzhennosti podvagonnogo oborudovaniya [Reduction of dynamic loading of wagon equipment]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway Transport], 2005, no. 10, pp. 60–62.
12. Efimov N.A., Andronchev I.K., Efimov I.N. Chislennyye issledovaniya zhestkosti perspektivnykh amortiziruyushchikh ustroystv khodovykh chastei podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Numerical studies of the rigidity of the first shock-absorbing devices of the running gear of the rolling stock of railways]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region], 2011, no. 3 (27), pp. 9–14.
13. Efimov N.A., Al'mukanov A.A., Efimov I.N. Opredelenie zhestkosti elastichnogo toroobraznogo amortizatora [Determination of the stiffness of an elastic torus-shaped shock absorber]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga region], 2012, no. 5 (35), pp. 43–49.
14. Rivlin R.S., Saunders D.W. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials VII. Experiments on the Deformation of Rubber. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1951, vol. 243 (865), pp. 251–288.
15. ANSYS 2019 R1 – Raschetnye vozmozhnosti [ANSYS 2019 R1 – Calculation capabilities]. ZAO «KADFEM Si-Ei-Es» Publ., 2019. 142 p.
16. Demareva A.V., Kibets A.I., Skobeeva M.V., Savichin O.G., Lyakhov A.F. Finite Element Method Study of the Protection Damping Elements Dynamic Deformation. *Advanced Structured Materials*, 2021, vol. 137, pp. 57–66.
17. Sidnyaev N.I. Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh [Theory of experiment planning and analysis of statistical data]. Moscow: Yurait Publ., 2019. 495 p.
18. Anisimov V.N., Litvinov V.L. Analiz vliyaniya dvizheniya granits pri issledovanii rezonansnykh svoystv sistem s dempfirovaniem [Analysis of the influence of boundary motion in the study of resonant properties of systems with damping]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences], 2009, no. 2 (19), pp. 147–152.
19. Barvinok V.A., Kirilin A.N., Komarov A.D., Moiseev V.K., Samokhvalov V.P., Fedotov Yu.V. Vysokoeffektivnyye tekhnologicheskie protsessy izgotovleniya elementov truboprovodnykh i toplivnykh sistem letatel'nykh apparatov [Highly efficient technological processes of manufacturing elements of pipeline and fuel systems of aircraft]. Moscow: Nauka i tekhnologii Publ., 2002. 394 p.

Информация об авторах

Ефимов Николай Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрического транспорта, Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара; e-mail: efimov.nikolai@mail.ru.

Тычков Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрического транспорта, Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара; e-mail: al2000@rambler.ru.

Information about the authors

Nikolai A. Efimov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Transport, Samara State Transport University, Samara; e-mail: efimov.nikolai@mail.ru.

Alexander S. Tychkov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Transport, Samara State Transport University, Samara; e-mail: al2000@rambler.ru.

Перспективные энергетические технологии электрической тяги поездов

Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев, Н.П. Асташков, Л.А. Байкова, В.В. Немыкина✉

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

✉nemykinavv@mail.ru

Резюме

Перспективные технологии электрической тяги поездов разрабатываются для увеличения провозной и пропускной способностей с максимальным использованием производимого и эксплуатируемого в настоящее время оборудования в России, с применением новых научных разработок, современной полупроводниковой техники и электромагнитных аппаратов в системе тягового электроснабжения постоянного тока высокого напряжения и на тяговом электроподвижном составе. С разработкой энергосберегающей технологии преобразования переменного трехфазного напряжения в постоянное высокое напряжение, а также с применением трехфазных асинхронных тяговых электродвигателей НТА-1200 коэффициент полезного действия электрической тяги поездов составил 87,4 %, он повышается на 13 % с увеличением суммарной массы поездов в 2,5 раза и скорости движения на 31,7 % по сравнению с тягой на переменном токе напряжением 25 кВ частотой 50 Гц. В спектре высших гармоник фазного напряжения и тока устранены третья и кратные трем гармонические составляющие, которые присутствуют при использовании трехфазных двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа. Суммарный коэффициент гармонических составляющих фазного напряжения в первичных обмотках трех однофазных преобразовательных трансформаторов ОРДТНЖ-25000-220-У1 с напряжением расщепленных вторичных обмоток $U_2 = 27,5$ кВ составляет 0,94 %. Результаты исследования электрической тяги получены с использованием токоведущих частей контактной подвески ПБСМ-95, МФ-100, А-185, которая эксплуатируется на железной дороге переменного тока напряжением 25 кВ частотой 50 Гц. С увеличением площади поперечного сечения проводов контактной подвески можно выполнять тягу трех соединенных поездов суммарной массой 24 980 т с трехсекционными электровозами со скоростью 69 км/ч. При повышении частоты напряжения на обмотках статора асинхронного тягового двигателя до $f_{\max} = 135$ Гц можно обеспечивать скорость движения грузовых поездов до 143 км/ч, что на 69 % быстрее по сравнению с тягой электроподвижного состава, оснащенного коллекторными машинами.

Ключевые слова

технологии электрической тяги поездов, тяговый электроподвижной состав, трехфазный выпрямитель, преобразовательный трансформатор, спектральный анализ, гармонические составляющие, трехфазный асинхронный двигатель, напряжение, ток, электрическая тяга

Для цитирования

Перспективные энергетические технологии электрической тяги поездов / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев, Н.П. Асташков, Л.А. Байкова, В.В. Немыкина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 215–226. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).215-226.

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 29.11.2022 г.; принята к публикации: 30.11.2022 г.

Promising energy technologies for electric traction of trains

N.L. Ryabchenok, T.L. Alekseeva, L.A. Astrakhantsev, N.P. Astashkov, L.A. Baikova, V.V. Nemykina✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉nemykinavv@mail.ru

Abstract

Advanced electric train traction technologies are currently being developed in Russia to increase carrying and throughput capacity making maximum use of the equipment currently manufactured and operated in Russia using new scientific developments, modern semiconductor technology and electromagnetic devices in the high-voltage DC traction power supply system and on traction electric rolling stock. The efficiency of electric traction trains is substantially increased by using energy-saving technology of conversion of AC three-phase voltage into DC high voltage and application of three-phase asynchronous traction motors NTA-1200. The efficiency of electric traction of trains was 87,4 % increasing by 13 % with 2,5 times increase of trains total mass and by 31,7 % in the speed as compared to AC traction with voltage 25 kV and frequency 50 Hz. The third and multiples of three harmonics are eliminated in the spectrum of higher harmonics of phase voltage and current which are present when using three-phase twelve-pulse series rectifiers. The total coefficient of harmonic components of the phase voltage in the primary windings of three single-phase converter transformers ORDTNzh-25000-220-U1 is 0,94 %, with voltage of the split secondary windings $U_2 = 27,5$ kV. The results of electric traction research were obtained using current-carrying parts of PBСM-95, MF-100, A-185 contact pendant operated on an AC railway with a voltage of 25 kV and frequency 50 Hz. It is possible to traction three connected trains with total mass of 24 980 t and three-section electric locomotives with speed of 69 km/h with increase of cross-

sectional area of contact suspension wires. By increasing the voltage frequency on asynchronous traction motor stator windings to $f_{\max} = 135$ Hz, it is possible to provide freight train speed of up to 143 km/h. This is 69 % more than the traction of trains equipped with collector machines.

Keywords

technologies of electric traction of trains, traction electric rolling stock, three-phase rectifier, converter transformer, spectrum analysis, harmonic components, three-phase induction motor, voltage, current, electric traction

For citation

Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A., Astashkov N.P., Baikova L.A., Nemykina V.V. Perspektivnye energeticheskie tekhnologii elektricheskoi tyage poezdov [Promising energy technologies for electric traction of trains]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 215–226. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).215-226.

Article Info

Received: October 10, 2022; Received: November 29, 2022; Accepted: November 30, 2022.

Введение

Система внешнего электроснабжения (СВЭ) трехфазным переменным током напряжением 220, 110 кВ [1] обеспечивает современную провозную и пропускную способности железной дороги и дальнейшее значительное увеличение объема транспортных работ. К энергетическим технологиям электрической тяги поездов, которые применяются для решения задач холдинга ОАО «РЖД» [2], относятся:

- технология преобразования трехфазного переменного напряжения в постоянное;
- технология передачи энергии на тяговый электроподвижной состав (ЭПС);
- технология согласования постоянного высокого напряжения с напряжением тяговых электрических двигателей (ТЭД);
- технология управления мощностью ЭПС.

Результаты выполнения перечисленных технологических операций для электрической тяги поездов зависят друг от друга, а технологическое оборудование закреплено за несколькими структурными организациями и эксплуатируется специализированным инженерным персоналом. Технология преобразования трехфазного напряжения СВЭ в постоянное напряжение 3,3 кВ используется для реализации упрощенной технологии согласования напряжения 3,3 кВ с напряжением 1 000–1 500 В коллекторных ТЭД ЭПС, применения контактной аппаратуры, группировки ТЭД и реостатов [3]. К достоинствам трехфазных двенадцатипульсовых мостовых выпрямителей последовательного типа [4], которые применяются для получения постоянного напряжения 3,3 кВ на тяговых преобразовательных подстанциях (ТПП), сле-

дует отнести удовлетворительную электромагнитную совместимость их с СВЭ, низкий уровень пульсаций выпрямленного тока и жесткость внешних характеристик. Недостатками технологии являются: сложная конструкция преобразовательного трансформатора, дополнительные потери активной мощности из-за коротких замыканий вторичных обмоток трансформатора во время коммутации тока в силовых полупроводниковых приборах (СПП) выпрямителя [5] и большая сила выпрямленного тока в контактной сети, которая возрастает с увеличением объема транспортных работ, рост потери электрической энергии и потери напряжения [6]. Понижение энергетической эффективности и скорости вождения поездов из-за потерь напряжения сопровождается проблемами при решении задач по усилению тягового электроснабжения [7] и обеспечению удовлетворительного токосъема с контактного провода на токоприемник ЭПС [8].

Технология преобразования трехфазного напряжения СВЭ в трехфазное переменное напряжение 27,5 кВ частотой 50 Гц позволяет снизить плотность тока в контактной сети и потери активной мощности. Падение напряжения в тяговых трансформаторах подстанций, в контактной сети переменного тока и в тяговых трансформаторах ЭПС из-за индуктивного сопротивления и импульсно-фазового управления тиристорами однофазного выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) ЭПС ограничивают возможность увеличения массы поездов и скорости их вождения [9].

Технологии передачи электрической энергии на постоянном токе напряжением 3,3 кВ и на переменном напряжении 25 кВ, частотой 50 Гц применяются на железных доро-

гах. В настоящее время разрабатываются технологии передачи электрической энергии на ЭПС [10], которые направлены на устранение отмеченных недостатков, но конструкции контактных подвесок и устройств токосъема ЭПС усложняются и снижается их надежность по сравнению с эксплуатируемым оборудованием.

Технология согласования напряжения контактной сети постоянного тока напряжением 3,3 кВ с постоянным напряжением на входе трехфазных автономных инверторов напряжения (АИН) [11, 12] ЭПС с применением асинхронных трехфазных тяговых двигателей (АТД) с короткозамкнутым ротором [13] выполняется коммутаторами постоянного тока и преобразованием в частотно-регулируемое трехфазное линейное номинальное напряжение 2 183 В на обмотках статора АТД.

Недостатки современных технологий и организации электрической тяги поездов сдерживают дальнейшее увеличение производительности транспортировки грузов, а экспериментальные (в основном организационного характера) способы повышения скорости поездов и их массы [14] сопровождаются зачастую недопустимой нагрузкой на силовое оборудование, неоправданными энергетическими затратами и увеличением электромагнитных помех, которые отрицательно воздействуют на оборудование смежных структурных подразделений железной дороги, нетяговых потребителей

электрической энергии [15, 16].

Целью работы является исследование новых технических решений с применением усовершенствованного трехфазного выпрямителя, которым устраняются короткие замыкания вторичных обмоток преобразовательного трансформатора на ТПП с повышением постоянного напряжения в контактной сети, с применением входного преобразователя постоянного тока высокого напряжения, трехфазных АИН и трехфазных тяговых АТД с короткозамкнутым ротором на ЭПС.

Теоретическое обоснование

В системах электрической тяги поездов на переменном и постоянном токе получили широкое применение коллекторные тяговые электрические машины, основным недостатком которых является ограниченная скорость движения локомотива, не позволяющая отрасли повысить провозную и пропускную способности железной дороги. Нашим соотечественником, ученым М.О. Доливо-Добровольским разработана бесколлекторная электрическая машина, обеспечивающая линейное и вращающее движение без ограничения скорости. Решение исходной системы (1) трехфазной асинхронной электрической машины с вращающимся короткозамкнутым ротором [17] позволяет определить рабочие, механические и тяговые характеристики АТД:

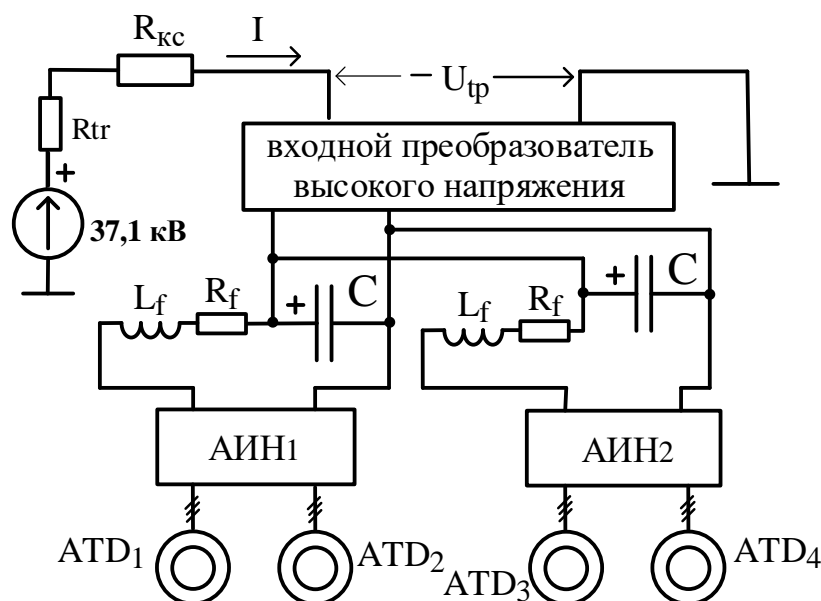


Рис. 1. Электрическая схема тягового привода одной секции электроподвижного состава
Fig. 1. Electrical diagram of the traction drive for one section of an electric locomotive

$$\left. \begin{aligned} u_s &= R_s \cdot i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + L_m \frac{di_0}{dt} - e_s; \\ 0 &= e'_r - R'_r \cdot i'_r - L'_r \frac{di'_r}{dt} - R'_r \frac{1-s}{s} \cdot i'_r; \\ i_s &= i_0 - i'_r; \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot (M_e - |M_c| \text{sign } \omega_r), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где R_s – активное сопротивление обмотки статора; L_s – индуктивность рассеяния обмотки статора; L_m – индуктивность ветви намагничивания; R'_r – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к числу витков обмотки статора; L'_r – приведенная к числу витков обмотки статора индуктивность рассеяния обмотки ротора; s – скольжение ротора относительно вращающегося магнитного поля статора; u_s , e_s , e'_r – мгновенные значения напряжения ЭДС соответственно статора, ЭДС ротора, приведенной к числу витков обмотки статора; i_s , i_0 , i'_r – мгновенные значения тока соответственно статора, ветви намагничивания, ротора, приведенного к числу витков обмотки статора; ω_r – угловая частота вращения ротора; M_e – электромагнитный момент; J – суммарный момент инерции ротора и рабочей машины.

К настоящему времени освоена технология преобразования постоянного напряжения в трехфазное симметричное импульсное напряже-

ние с помощью трехфазных АИН, собранных на IGBT-транзисторах.

Входным преобразователем высокого напряжения выполняется согласование напряжения U_{ip} на токоприемнике тягового ЭПС с постоянным напряжением U_d на входе АИН (рис. 2) для формирования симметричного трехфазного импульсного напряжения.

Кривая огибающей мгновенных значений симметричных фазных токов i_s близка по форме к синусоиде и формируется за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ) двуполярных импульсов напряжения прямоугольной формы, которые прикладываются к трехфазным обмоткам статора (см. рис. 1). Реализация алгоритма управления силовыми транзисторами АИН обеспечивается с помощью второй модулирующей функции u_{M2} , смещенной по фазе на 180° эл. относительно u_{M1} и несущего развертывающего сигнала треугольной формы u_H (см. рис. 2).

Выбором закона частотного управления АТД с использованием понятия глубины модуляции $\mu = U_{mv}/U_{m1}$ и коэффициента модуляции $K_{ШИМ} = f_H/f_M$ определяется величина постоянного напряжения U_d на входе АИН. В России изготавливается тяговый трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором НТА-1200 [18], мощность в часовом режиме работы 1 200 кВт и в продолжительном режиме работы – 1 170 кВт, с линейным напря-

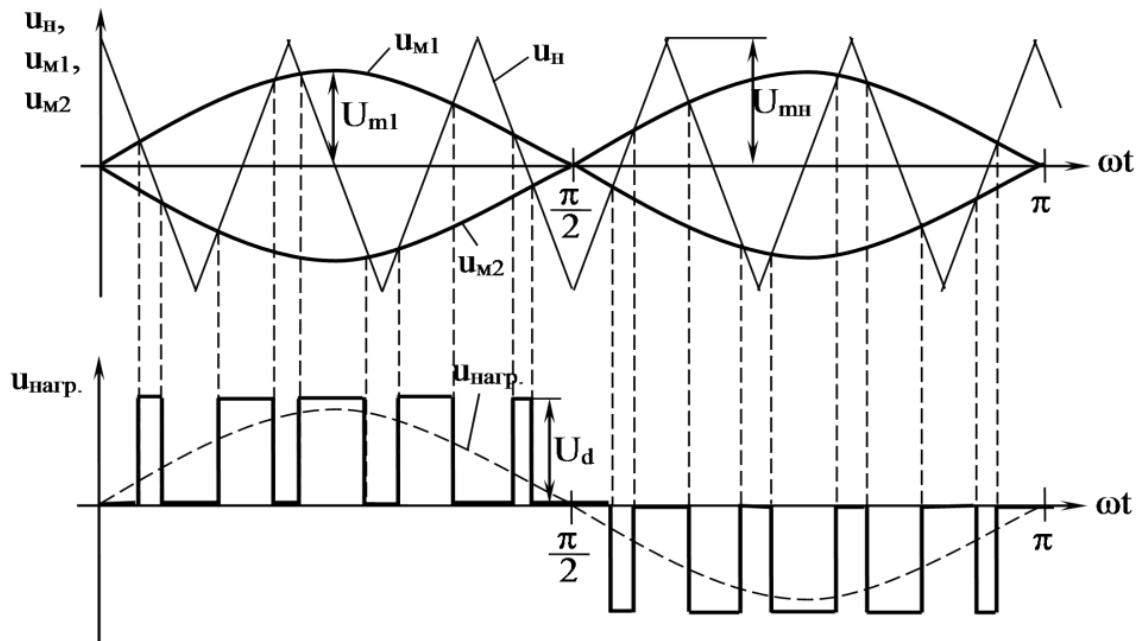


Рис. 2. Временные диаграммы напряжений при реализации широтно-импульсной модуляции

Fig. 2. Time diagrams of voltages when implementing pulse-width modulation

жением 2 183 В, фазным током 385/376 А номинальной частотой $f_H = 65,4$ Гц, номинальной частотой вращения ротора $n_H = 1\,295$ об/мин, номинальным вращающим моментом 8,629 кН·м, $\eta = 95,7 / 95,8$ %, $K_M = 0,861$, $f_{max} = 135$ Гц, $n_{max} = 2\,680$ об/мин. На вход АИН нужно прикладывать постоянное напряжение $U_d \geq 2\,950$ В для обеспечения на трехфазных обмотках статора электродвигателя номинальное линейное напряжение. В системе тягового электроснабжения можно применить токоведущие части контактной подвески ПБСМ-95, МФ-100, А-195, которая эксплуатируется на железной дороге переменного тока напряжением 25 кВ и частотой 50 Гц. Технология энергосберегающего обеспечения электрической тяги поездов на постоянном токе напряжением 37,1 кВ реализуется с применением трех однофазных трансформаторов (рис. 3). Однофазные трехобмоточные преобразовательные трансформаторы ОРДТНЖ-25000-220-У1 с напряжением расщепленных вторичных обмоток $U_2 = 27,5$ кВ эксплуатируются в настоящее время на железной дороге в системе электрической тяги на переменном токе напряжением 2×25 кВ частотой 50 Гц и используются для электроснабжения прилегающих к железным дорогам районов, предприятий.

Регулирование напряжения осуществляется на стороне НН в диапазоне $+ 8 \times 2$ % от номинального в каждой из расщепленных частей обмотки. Переключение осуществляется синхронно одним трехфазным переключающим устройством типа SDV3-630-41/41-W19 с подсоединением каждой расщепленной обмотки к изолированной фазе переключающего устройства. Обмотка СН на напряжение 38,5 кВ имеет

ответвления для переключателя без возбуждения в пределах $+ 2 \times 2,5$ %. Обмотка СН в комплектации на напряжение 11 кВ – без регулирования напряжения [19].

К расщепленным вторичным обмоткам однофазных преобразовательных трансформаторов присоединены через распределительное устройство РУ-27,5 кВ трехфазные выпрямители конструкции Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС) (см. рис. 3). К шинам выпрямленного напряжения через РУ-37,1 кВ, фидеры и отсасывающий провод присоединяется контактная и рельсовая сети. Поток электрической энергии из трехфазной сети распределяется по трем однофазным трансформаторам, по двум расщепленным вторичным обмоткам трансформаторов и по двум трехфазным выпрямителям, а затем суммируется на шинах выпрямленного тока. Данное техническое решение позволяет исключить короткие замыкания вторичных обмоток во время коммутации тока СПП выпрямителей.

Расчеты и оценки энергетических, электромагнитных процессов в каждом силовом блоке и системы энергетического обеспечения в целом выполнены с помощью предложенных аналитических выражений [20], обоснованных уточненным законом сохранения энергии, с применением второго закона Кирхгофа, компьютерного моделирования и спектрального анализа электрических величин.

Метод и результаты исследования

Минимальные потери при выполнении работы электрической энергией, которые характеризуются активной мощностью ΔP про-

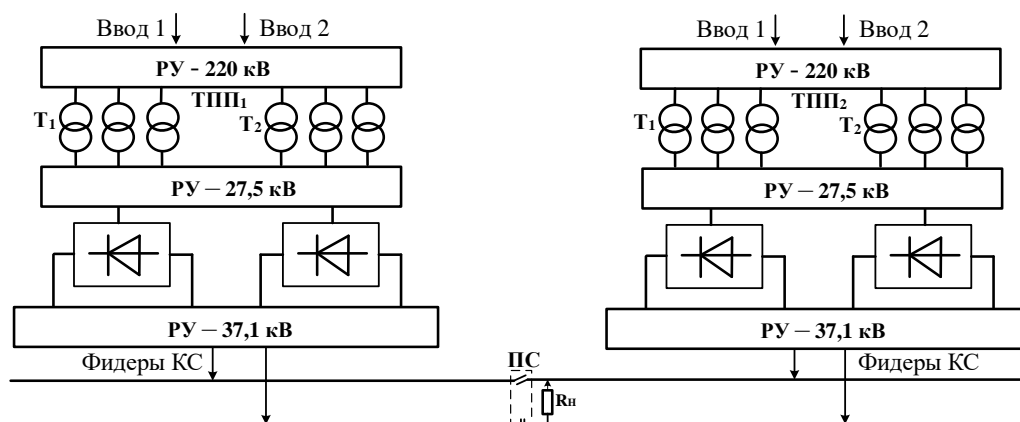


Рис. 3. Структурная схема энергетического обеспечения тяги поездов

Fig. 3. The structural diagram of the energy supply for train traction

порциональны квадрату тока в каждом силовом блоке и системы энергетического обеспечения в целом. Приоритет направлений технических решений по энергосбережению в технологических процессах [20] определяется минимальным действующим током I , зависящим от величины напряжения U , от эффективности использования регулятором мощности электрического потенциала U_P на входе регулятора и от объема работы P и Q , которая выполняется электрической энергией (2):

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{U^2 - U_P^2}}. \quad (2)$$

Для решения исходной системы нелинейных дифференциальных уравнений (1) можно разложить напряжения и токи на оси d и q ортогональной системы [21], вращающейся относительно начала координат с синхронной круговой частотой ω напряжения на обмотках статора асинхронного трехфазного электродвигателя (3), которая приведена к форме, удобной для расчета на компьютере:

$$\left. \begin{aligned} u_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \frac{di'_{qr}}{dt} + \omega(L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr}); \\ u_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \frac{di'_{dr}}{dt} - \omega(L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr}); \\ u'_{qr} &= R'_r \cdot i'_{qr} + L'_r \frac{di'_{qr}}{dt} + L_m \frac{di_{qs}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot (L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i_{qs}); \\ u'_{dr} &= R'_r \cdot i'_{dr} + L'_r \frac{di'_{dr}}{dt} + L_m \frac{di_{ds}}{dt} - (\omega - \omega_r) \cdot (L'_r \cdot i'_{dr} + L_m \cdot i_{ds}); \\ M_C &= 1,5P \cdot [(L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr}) \cdot i_{qs} - (L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr}) \cdot i_{ds}]; \end{aligned} \right\} (3)$$

Расчеты энергетических и электромагнитных процессов выполнены с помощью программы Matlab в среде Simulink с применением характеристик и выпрямителей трехфазного напряжения конструкции ИрГУПС.

Предложенные системы энергетического обеспечения электрической тяги поездов принципиально отличаются от известных эксплуатируемых в настоящее время тем, что управление мощностью выполняется за счет плавного изменения входного электрического сопротивления. При пуске тягового электропривода грузового электровоза IGBT-транзисторы АИН (см. рис. 1) заперты.

Из контактной сети на токоприемник ЭПС в начале поступает ток 10 А для зарядки промежуточных емкостных накопителей энергии C , а входное сопротивление тягового электропривода составляет $R_{ВХ} \approx 3\,700$ Ом. После зарядки накопителей энергии ток заряда I_{tp} снижается до нуля, а напряжение повышается до напряжения в контактной сети $U_{tp} = 37\,100$ В (рис. 4) и входное сопротивление увеличивается $R_{ВХ} \approx \infty$.

В момент времени $t = 0,02$ с IGBT-транзисторы АИН опираются и на обмотки статора АТД ЭПС подается трехфазное напряжение частотой 5 Гц, а контактная сеть и тяговая подстанция (ТП) загружаются током I_{tp} , но скорость вращения вала электродвигателей $n = 0$.

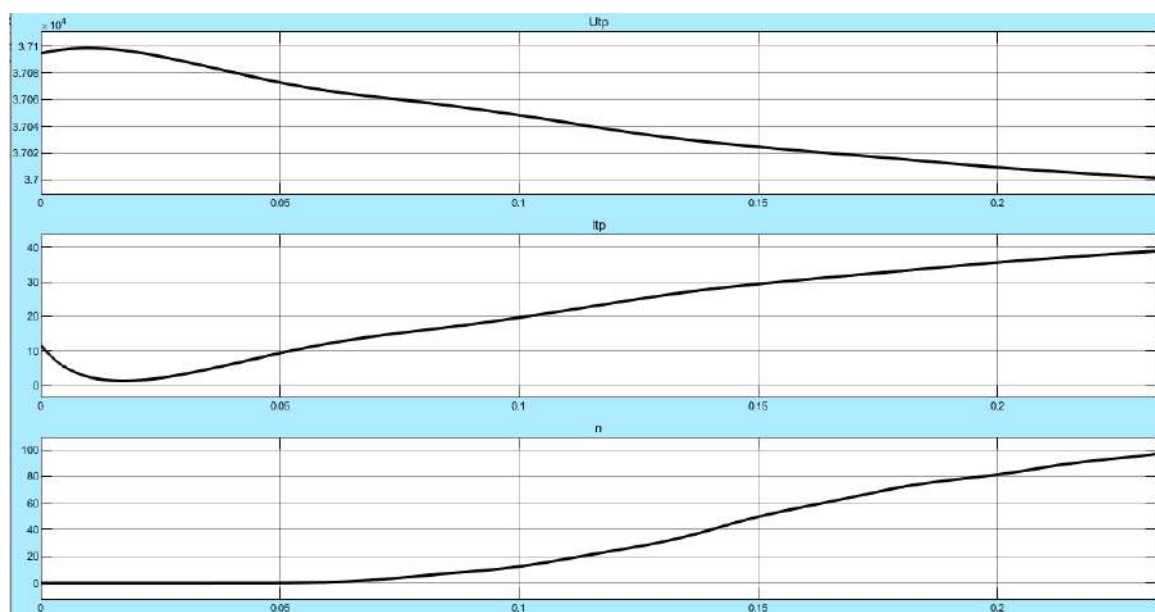


Рис. 4. Осциллограммы напряжения U_{tp} , тока I_{tp} и скорости вращения вала n

Fig. 4. Oscillograms for voltage U_{tp} , current I_{tp} and shaft speed n

При $I_{np} = 13$ А вал электродвигателей начинает вращаться, повышается скорость до $n = 97$ об/мин., повышается ток до $I_{np} = 40$ А и снижается напряжение на токоприемнике до $U_{np} = 37$ кВ, а входное электрическое сопротивление ЭПС уменьшается до $R_{BX5} = 925$ Ом. Коэффициент полезного действия (КПД) электрической тяги при скорости движения $V = 5$ км/ч составляет $\eta_{ЭТ} = 63,8$ %. Так как АТД при $f = 5$ Гц работает на жесткой рабочей ветви механической характеристики, то при пуске для ограничения ускорения, обеспечения надежного сцепления колес с рельсами и для исключения автоколебаний в системе возникает необходимость в повышении входного электрического сопротивления АТД, в применении ПИД-регулятора с использованием обратных связей по скорости вращения вала и по току в обмотках статора

АТД для согласования величины коэффициента модуляции и глубины модуляции напряжения ШИМ в системе управления АИН.

Математическая модель тяги соединенного поезда суммарной массой 18 800 т тремя трехсекционными электровозами с АТД, которые работают в середине межподстанционной зоны, и системы обеспечения движения (СОД) поездов постоянного тока напряжением 37,1 кВ (рис. 5) позволяет оценить энергетические и электромагнитные свойства системы.

Суммарное входное электрическое сопротивление трех ЭПС R_{BX5} снизилось с 309 до 30 Ом. Результаты спектрального анализа (рис. 6) мгновенных значений фазного напряжения и тока в первичной обмотке преобразовательного трансформатора ТПП получены с помощью осциллографа ASM, блока powergui и применения

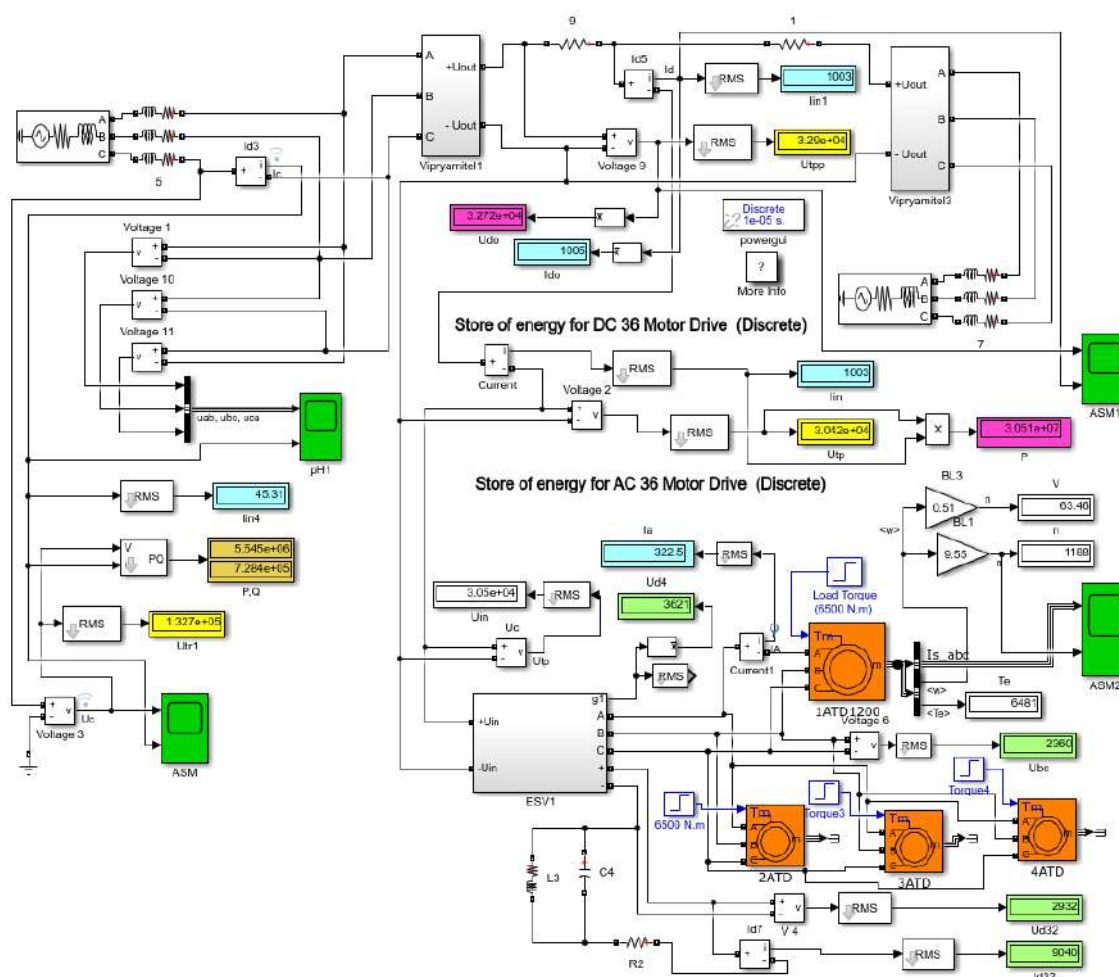


Рис. 5. Математическая модель системы обеспечения движения и электроподвижного состава постоянного тока напряжением 37,1 кВ с асинхронным тяговым двигателем в установившемся режиме работы при $V = 63$ км/ч, массе поезда 18 800 т

Fig. 5. Mathematical model of traffic support systems and 37.1 kV DC electric rolling stock with asynchronous three-phase traction motors in steady operation mode at $V = 63$ km/h, train mass 18 800 t

программы быстрого преобразования Фурье FFT.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих фазного напряжения в трехфазной сети на входе системы энергетического обеспечения тяги соединенных поездов (THD) 0,94 %, тока – 39,31 %.

В спектре высших гармоник фазного напряжения и тока (табл. 1) устранены третья и кратные трем гармонические составляющие, присутствующие при использовании трехфазных двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа.

Ток высших гармоник смещен по фазе относительно напряжения приблизительно на 90 и 270 °эл., т. е. высшие гармоники практически формируют реактивную мощность.

Конструкция входного преобразователя ЭПС (см. рис. 5) обладает свойством электрического полупроводникового вариатора (ESV1), преобразует для работы АТД постоянное напряжение 37,1 кВ и ток 1 003 А в контактной сети в постоянное напряжение 2 950 В и суммарный постоянный ток 10,78 кА на входе АИН. Постоянное напряжение 2 950 В и посто-

янный ток 10,78 кА на входе АИН преобразуются инверторами в трехфазное линейное напряжение 2 183 В частотой 60 Гц и линейный ток 322,5 А в обмотках статора одного НТА-1200 из 36 электродвигателей.

В табл. 2 даны показатели тяговых систем обеспечения движения поездов постоянного тока с напряжением в контактной подвеске 37,1 кВ.

В варианте 1 приведены показатели ранее исследованной СОД с трехфазным преобразовательным трансформатором мощностью 40 МВА, с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединена по схеме «звезда», а другая – по схеме «треугольник» [22]. К обмоткам подсоединен трехфазный двенадцатипульсовой мостовой выпрямитель последовательного типа. В середине межподстанционной зоны пункт секционирования и выполняется тяга трех соединенных поездов трехсекционными ЭПС с коллекторными тяговыми двигателями НБ-514Б.

В варианте 2 даны показатели ранее исследованной СОД с трехфазными двухобмоточными преобразовательными трансформаторами ТДТНЖ-40000-220-81, которые применяются

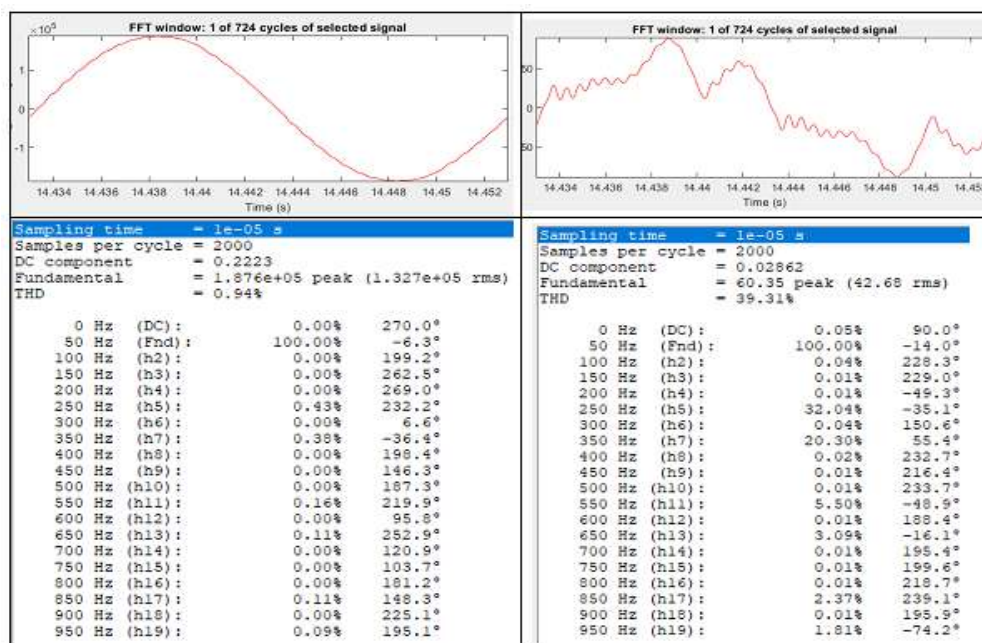


Рис. 6. Результаты спектрального анализа фазного напряжения и тока

Fig. 6. Results of spectral analysis of phase voltage and current

Таблица 1. Гармонические составляющие фазного напряжения и тока

Table 1. Harmonic components of phase voltages and currents

Номер гармоники Harmonic number	1	5	7	11	13	17	19	THD, %
U_{ϕ} , В	132700	570,6	504,3	212,3	146,0	146,0	119,0	0,94
I_{ϕ} , А	42,68	13,67	8,66	2,35	1,32	1,01	0,98	39,31

для тяги поездов на переменном токе напряжением 25 кВ, 50 Гц [22]. К вторичным обмоткам с напряжением 27,5 кВ присоединен трехфазный выпрямитель конструкции ИрГУПС. Три соединенных поезда с трехсекционными ЭПС, такие же как в варианте 1, работают в середине межподстанционной зоны.

В варианте 3 даны показатели СОД, полученные с применением оборудования, подробно рассмотренного в данной работе. Во всех вариантах СОД применяются одинаковые токоведущие части контактной подвески и нагрузка на валу ТЭД.

Таблица 2. Сравнительные показатели систем обеспечения движения поездов

Table 2. Comparative indicators of train support systems

Параметры системы обеспечения движения Propulsion System Parameters	Номер варианта		
	1	2	3
Полная мощность на входе ТПП1, ТПП2, МВА Apparent input power TCS1, TCS 2, MVA	35,07	35,77	36,07
Активная мощность на входе ТПП1, ТПП2, МВт Active input power TCS1, TCS2, MW	34,41	32,90	33,27
Коэффициент мощности электрической тяги Electric traction power factor	0,98	0,92	0,92
Коэффициент полезного действия выпрямительного агрегата, % Rectifier unit efficiency coefficient, %	99,2	99,0	99,2
Напряжение на выходе выпрямительного агрегата, кВ Voltage at the output of the rectifier unit, kV	41,47	34,89	32,9
Ток в токоприемнике электроподвижного состава, А Current in the current collector of the electric rolling stock, A	816,0	947,5	1 003
Потери активной мощности в контактной сети, МВт Loss of active power in the contact network, MW	1,665	2,157	2,52
Коэффициент полезного действия контактной сети, % Contact network efficiency coefficient, %	95,1	93,3	92,4
Суммарный ток в обмотке якоря 36 тяговых электродвигателей НБ-514Б, кА Total current in the armature winding of 36 traction motors NB-514B, kA	29,24	29,14	–
Суммарный ток на входе 36 автономных инверторов напряжения, кА Total input current 36 autonomous voltage inverter, kA	–	–	10,781
Коэффициент полезного действия входного преобразователя (ESV) электроподвижного состава, % Electric vehicle input converter efficiency coefficient (ESV), %	90,10	96,27	99,5
Скорость движения поезда, км/ч Train speed, km/h	50	50	63,4 (32,7%)
Масса трех соединенных поездов с трехсекционными электроподвижными составами, т Mass of three connected trains with three-section electric rolling stock, t	22 500	22 500	18 800
Суммарная мощность на валу 36 тяговых электродвигателей P _в , МВт Total shaft power 36 traction motors P _v , MW	27,6	27,6	29,11
Коэффициент полезного действия тягового электродвигателя НБ-514Б, НТА-1200, % Traction motor NB-514B, NTA-1200 efficiency coefficient, %	94,35	94,35	95,7
Коэффициент полезного действия электрической тяги поезда $\eta_{ЭТ} = (P_{в}/P) \cdot 100$ % Train electric traction efficiency coefficient, %	80,2	83,9	87,4
Суммарный коэффициент гармонических составляющих $u_{Ф}$, % Total harmonic distortion coefficient u_{F} , %	0,71	0,60	0,94
Суммарный коэффициент гармонических составляющих $i_{Ф}$, % Total harmonic distortion coefficient, i_{F} , %	16,16	24,95	39,31

Технические параметры НТА-1200 в продолжительном режиме работы [18] позволяют реализовать тягу двух соединенных поездов с трехсекционными электровозами суммарной массой 16 650 т со скоростью выше 70 км/ч. С увеличением площади поперечного сечения проводов контактной подвески можно выполнять тягу трех соединенных поездов суммарной массой 24 980 т с трехсекционными электровозами со скоростью до 69 км/ч.

Заключение

КПД электрической тяги поездов в третьем варианте повышается на 13 % с увеличением суммарной массы поездов в 2,5 раза и скорости

движения на 32,7 % по сравнению с тягой на переменном токе напряжением 25 кВ частотой 50 Гц за счет применения постоянного тока высокого напряжения и трехфазных асинхронных ТЭД НТА-1200. При снижении суммарной массы трех соединенных поездов с трехсекционными электровозами и применении НТА-1200 вместо коллекторных ТЭД, с повышением частоты напряжения на обмотках статора АД до $f_{\max} = 135$ Гц можно повышать скорость движения грузовых поездов до 143 км/ч, что на 69 % выше по сравнению с тягой ЭПС, оснащенными коллекторными машинами.

Список литературы

1. Чернов Ю.А. Электроснабжение железных дорог. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2016. 406 с.
2. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. М. : М-во образования и науки РФ, 2014. 244 с.
3. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Екатеринбург : Урал. завод ж.-д. машиностр., 2008. 11 с.
4. Салита Е.Ю., Ковалева Т.В., Комякова Т.В. Обоснование внедрения двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа в системе электроснабжения метрополитена // Изв. Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 11–20.
5. Хохлов Ю.И., Сафонов В.И., Лонзингер П.В. Внешние и энергетические характеристики двенадцатифазных компенсированных выпрямителей с векторным управлением // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. 2014. Вып. 4. № 14. С. 37–45.
6. Аржанников Б.А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов. Екатеринбург : УрГУПС, 2012. 207 с.
7. Аржанников Б.А., Набойченко И.О. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3,0 кВ. Екатеринбург : УрГУПС, 2015. 258 с.
8. Сидоров О.А., Смердин А.Н., Чертков И.Е. Взаимодействие токоприемников с контактными подвесками. Омск : ОмГУПС, 2014. 37 с.
9. Энергетическая эффективность тягового привода магистральных электровозов / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, А.Л. Астраханцев и др. // Изв. Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 29–41.
10. Аржанников Б.А. Трехфазная система электрической тяги переменного тока. Екатеринбург : УрГУПС, 2020. 142 с.
11. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. Т. 2. 307 с.
12. Francesco V., Luigi I. Dynamic and Control of Switched Electronic Systems // Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters. London : Springer, 2012. 492 p.
13. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов / Ю.А. Бахвалов, Г.А. Бузало, А.А. Зарифьян и др. М. : Маршрут, 2006. 374 с.
14. Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Повышение энергетической эффективности перевозочного процесса на основе изменения параметров графика движения поездов. Омск : ОмГУПС, 2019. 250 с.
15. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic compatibility in railways: Analysis and management. Berlin: Springer, 2013. 600 p.
16. Наумов А.А. Электромагнитная совместимость тяговых сетей электрифицированных железных дорог с рельсовыми цепями при пропуске поездов повышенного веса и длины. М. : ВНИИЖТ, 2007. 197 с.
17. Кулик Ю.А. Электрические машины. М. : Высш. шк., 1971. 456 с.
18. Каталог тяговых электродвигателей ОАО НПО «Новочеркасский электровагоностроительный завод» // Региональный Центр Инновационных Технологий : сайт. URL: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html> (Дата обращения: 30.09.2022).
19. Каталог трансформаторы III – VIII габарита ООО «Энерготранс» напряжением 10 – 220 кВ для электрифицированных железных дорог переменного тока // Энерготранс : сайт. URL: http://www.tmg66.ru/catalog/?il_cdid=104 (Дата обращения: 30.09.2022).
20. Энергетическая эффективность в электрических цепях с полупроводниковыми приборами / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев и др. // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20. № 2. С. 89–98.
21. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб. : КОРОНА-Век, 2008. 368 с.

22. Оценка энергетической эффективности элементов энергетической системы / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев и др. // Образование – Наука – Производство : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2020. Т. 1. С. 109–115.

References

1. Chernov Yu.A. *Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog* [Railway power supply]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 216. 406 p.
2. Prognoz nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda [Forecast of scientific and technological development of the Russian Federation for the period up to 2030]. Moscow: Ministerstvo obrazovaniya i nauki RF Publ., 2014. 244 p.
3. Elektrovoz gruzovoi postoyannogo toka 2ES6 s kollektornymi tyagovymi elektrodvigatelyami [DC electric freight locomotive 2ES6 with collector traction motors]. Ekaterinburg: Ural'skii zavod zheleznodorozhnogo mashinostroeniya Publ., 2008. 11 p.
4. Salita E.Yu., Kovaleva T.V., Komyakova T.V. Obosnovanie vnedreniya dvenadtsatipul'sovykh vypryamitelei posledovatel'nogo tipa v sisteme elektrosnabzheniya metropolitena [Justification of the introduction of twelve-pulse rectifiers of serial type in the metro power supply system]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2020, no. 1 (41), pp. 11–20.
5. Khokhlov Yu.I., Safonov V.I., Lonzinger P.V. Vneshnie i energeticheskie kharakteristiki dvenadtsatipul'snykh kompensirovannykh vypryamiteley s vektornym upravleniem [External and Energy Characteristics of Twelve-pulse Compensated Vector-controlled Rectifiers]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Energetika»* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2014, vol. 4, no. 14, pp. 37–45.
6. Arzhannikov B.A. Tyagovoe elektrosnabzhenie postoyannogo toka skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya poezdov [Traction DC power supply for high-speed and heavy-duty train traffic]. Yekaterinburg: UrGUPS Publ., 2012. 207 p.
7. Arzhannikov B. A., Naboichenko I.O. Kontsepsiya usileniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka napryazheniem 3,0 kV [Concept of 3,0 kV DC traction power supply system reinforcement]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2015. 258 p.
8. Sidorov O.A., Smerdin A.N., Chertkov I.E. Vzaimodeistvie tokopriemnikov s kontaktными podveskami [Interaction of current collectors with overhead wires]. Omsk: OmGUPS Publ., 2014. 37 p.
9. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' tyagovogo privoda magistral'nykh elektrovozov [Energy efficiency of mainline electric locomotive traction drive]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2020, no. 1 (41), pp. 29–41.
10. Arzhannikov B. A. Trekhfaznaya sistema elektricheskoi tyagi peremennogo toka [Three-phase AC electric traction system]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2020. 142 p.
11. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and Converter Technology]. Moscow: UMTS ZHDT Publ., 2015. Vol. 2 307 p.
12. Francesco V., Luigi I. *Dynamic and Control of Switched Electronic Systems. Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters*. London : Springer, 2012. 492 p.
13. Bakhvalov Yu.A., Buzalo G.A., Zariif'yan A.A., Petrov P.Yu. Dinamicheskie protsessy v asinkhronnom tyagovom privode magistral'nykh elektrovozov [Dynamic processes in asynchronous traction drive of mainline electric locomotives]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 374 p.
14. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti perevoznogo protsessa na osnove izmeneniya parametrov grafika dvizheniya poezdov [Improving the energy efficiency of the transport process by changing the parameters of the train timetable]. Omsk: OmGUPS Publ., 2019. 250 p.
15. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic compatibility in railways: Analysis and management*. Berlin: Springer, 2013. 600 p.
16. Naumov A.A. Elektromagnitnaya sovmestimost' tyagovykh setey elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog s rel'sovymi tsepyami pri propuske poezdov povyshennogo vesa i dliny [Electromagnetic compatibility of traction networks of electrified railways with track circuits for heavy and long trains]. Moscow: VNIIZhT Publ., 2007. 197 p.
17. Kulik Yu.A. Elektricheskie mashiny [Electrical machines]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1971. 456 p.
18. Katalog tyagovykh elektrodvigatelei OAO NPO «Novocherkasskii elektrovozostroitel'nyi zavod» (Elektronnyi resurs) [Traction motors catalogue of NovoCherkassk Electric Locomotive Plant (Electronic resource)]. Available at: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html> (Accessed September 30, 2022).
19. Katalog transformatory III – VIII gabarita OOO «Energotrans» napryazheniem 10 – 220 kV dlya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka (Elektronnyi resurs) [Catalogue transformers size III – VIII of Energotrans Ltd. of voltage 10 – 220 kV for electrified AC railways (Electronic resource)]. Available at: http://www.tmg66.ru/catalog/?il_cdid=104 (Accessed September 30, 2022).
20. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' v elektricheskikh tsepyakh s poluprovodnikovymi priborami [Energy Efficiency of Electrical Circuits Carrying Semiconductor Devices]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Energetika»* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2020, vol. 20, no. 2, pp. 89–98.
21. German-Galkin S.G. *Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK* [Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC]. Saint-Petersburg: KORONA-Vek Publ., 2008. 368 p.
22. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Nemykina V.V. Otsenka energeticheskoi effektivnosti elementov energeticheskoi sistemy [Evaluation of the energy efficiency of the elements of the energy system]. *Materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference Education – Science – Production]. Chita, 2020, vol. 1, pp. 109–115.

Информация об авторах

Алексеева Татьяна Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: talecseeva843@gmail.com.

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

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

Асташков Николай Павлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: astashbir@rambler.ru.

Байкова Людмила Анатольевна, старший преподаватель кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: l.baykova63@gmail.com.

Немыкина Валентина Валерьевна, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: nemykinavv@mail.ru.

Information about the authors

Tatyana L. Alekseeva, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: talecseeva843@gmail.com.

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

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

Nikolai P. Astashkov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: astashbir@rambler.ru.

Lyudmila A. Baikova, Assistant Professor of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: l.baykova63@gmail.com.

Valentina V. Nemykina, Ph.D. student of the Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: nemykinavv@mail.ru.

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА**

**INFORMATION TECHNOLOGY,
MANAGEMENT AND PROCESSING**

Применение алгоритма нечеткой логики Мамдани для отбора игроков в футбольный клуб на предсезонных сборах

С.Т. Дусакаева✉, И.А. Хохлов, П.Л. Нирян, М.П. Носарев

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Российская Федерация

✉slushashdusakaeva@rambler.ru

Резюме

В статье рассматриваются вопросы отбора игроков в футбольную команду в контексте решения актуальной проблемы подбора профессионального персонала в организации и на предприятия. Актуальность указанной проблемы обусловлена нестабильной политической обстановкой в мире, экономическими реформами и социальной адаптацией дипломированных специалистов. Применяемый в настоящее время работодателями подход к отбору персонала, основанный преимущественно на оценке портфолио претендентов, не позволяет в полной мере решить рассматриваемую проблему. В эпоху цифровых технологий данная проблема может быть решена различными методами, благодаря которым строятся модели, способные давать более точные результаты. В качестве возможного инструментального средства для решения актуальной проблемы отбора игроков в футбольную команду, исходя из их характеристик, могут быть использованы методы и алгоритмы аппарата нечеткой логики ввиду высокой степени нечеткости рассматриваемых характеристик. Основным методом исследования выбран алгоритм нечеткой логики Мамдани, проведена апробация построенной нечеткой модели и интерпретированы полученные результаты. Примененный в проведенном исследовании подход к процессу отбора игроков в футбольную команду, основанный на нечетком алгоритме Мамдани, позволяет существенно увеличить процент наиболее подходящих клубу, дав быстрый оптимальный ответ. Указанное обстоятельство дает возможность снизить общую нагрузку на главного тренера, высвобождая дополнительное время на разработку стратегии игры и на организацию тренировочного процесса.

Ключевые слова

футбольная команда, методы нечеткой логики, алгоритм Мамдани, Matlab Fuzzy Logic Toolbox, терм-множества, нечеткие правила вывода

Для цитирования

Применение алгоритма нечеткой логики Мамдани для отбора игроков в футбольный клуб на предсезонных сборах / С.Т. Дусакаева, И.А. Хохлов, П.Л. Нирян, М.П. Носарев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 228–237. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).228-237.

Информация о статье

поступила в редакцию: 5.12.2022 г.; поступила после рецензирования: 20.12.2022 г.; принята к публикации: 21.12.2022 г.

Application of the Mamdani Fuzzy Logic Algorithm for the Selection of Players for a Football Club at the Preseason Training Camp

S.T. Dusakaeva✉, I.A. Khokhlov, P.L. Nirian, M.P. Nosarev

¹Orenburg State University, Orenburg, the Russian Federation

✉slushashdusakaeva@rambler.ru

Abstract

The article deals with the selection of players for a football team in the context of solving the actual problem of selecting professional personnel in organizations and enterprises. The relevance of the mentioned problem is due to the unstable political situation in the world, economic reforms and social adaptation of graduates. The currently used well-known methods for improving the quality of selection, using, for example, an assessment of an employee's portfolio, do not fully solve the problem under consideration. In the digital age, this problem can be solved by various methods, thanks to which models are built that can give more accurate results. It is substantiated that as a possible tool for solving the actual problem of selecting players for a football team based on their characteristics, methods and algorithms of the fuzzy logic apparatus can be used in view of the high degree of fuzziness of the characteristics under consideration. Mamdani's fuzzy logic algorithm was chosen as the main research method, the constructed fuzzy model was tested and the results obtained were interpreted. The approach used in the study to the process of selecting players for a football team, based on the Mamdani fuzzy algorithm, will significantly increase the percentage of players most suitable for the club, giving a quick optimal answer. This circumstance will reduce the load on the head coach, freeing up additional time to develop a game strategy and organize the training process.

Keywords

fuzzy logic methods, Mamdani's algorithm, football team, Matlab Fuzzy Logic Toolbox, term sets, fuzzy system operation rules

For citation

Dusakaeva S.T., Khokhlov I.A., Nirian P.L., Nosarev M.P. Primenenie algoritma nechetkoi logiki Mamdani dlya otbora igrokov v futbol'nyi klub na predsezonnnykh sborakh [Application of the Mamdani Fuzzy Logic Algorithm for the Selection of Players for a Football Club at the Preseason Training Camp]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 228–237. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).228-237.

Article Info

Received: December 5, 2022; Revised: December 20, 2022; Accepted: December 21, 2022.

Введение

Согласно приведенным статистическим данным [1], в ряде отраслей реального сектора экономики наблюдаются высокие показатели уволенных, а также отмечается рост количества выбывших сотрудников по сравнению с предыдущим аналогичным периодом времени. Чаще всего такие явления связаны с некачественным подбором персонала. В [2] предложены различные методы отбора сотрудников с разными показателями валидности, которые повышают эффективность данного процесса. В частности, это касается и футбола, где тренер пытается собрать оптимальный и конкурентоспособный коллектив. Успешность построения карьеры в различных спортивных дисциплинах зависит от многих характеристик спортсмена, а также их удачного сочетания или компенсации одних за счет присутствия других. Очевидно, что сбор данных о характеристиках футболистов и их последующий анализ – дело трудоемкое и затратное. Помимо этого, немаловажное влияние на процесс оценки характеристик футболиста оказывает и человеческий фактор, что увеличивает процент ошибок при отборе игроков в футбольную команду. В настоящее время наблюдается устойчивая отрицательная динамика качества игры футболистов, в том числе из-за некачественного подбора игроков тренерским штабом клуба. Однако данную проблему можно проецировать на любую организацию, занимающуюся подбором персонала. И, как показывает опыт, в таких случаях вполне оправданно для разработки систем поддержки принятия решений о найме персонала привлекать аппарат нечеткой логики, который позволяет имитировать человеческое мышление, но лишен субъективности оценки, и дает приемлемые результаты [3, 4]. В [5] предложена система поддержки принятия решений, позволяющая подбирать игроков и формировать команды в футболе исходя из характеристик

спортсменов, написанная на языке программирования C#.

Обзор источников показывает, что качественные характеристики отражают лучшую работу модели, чем количественные. В свою очередь, качественные характеристики, как правило, имеют высокую степень неопределенности, т. е. возникает нечеткость исходных данных исследования и, следовательно, обоснованно применение средств аппарата нечеткой логики. Эти средства отражаются в различных программах и технологиях. На текущий момент существует несколько инструментов, которые могли бы интерпретировать аппарат нечетких правил. В данном исследовании для разработки системы поддержки принятия решений при отборе игроков в футбольную команду применялась среда программирования Matlab Fuzzy Logic Toolbox. В [6, 7] более подробно рассмотрена работа с указанным прикладным обеспечением и теоретические материалы по проектированию нечетких систем.

В связи со сказанным представляется целесообразным для разработки системы поддержки принятия решений при отборе футболистов в футбольный клуб на предсезонных сборах привлекать модели и алгоритмы нечеткой логики.

Цель данной работы – выявление наиболее перспективных спортсменов в футбольную команду исходя из их характеристик с помощью инструментов нечеткой логики в среде программирования Matlab Fuzzy Logic Toolbox за счет совершенствования системы поддержки принятия решения, предложенной в [5].

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

- собрать данные о характеристиках футболистов, претендующих на место в команде;
- определить оптимальное количество входных переменных, выявив наиболее важные характеристики игроков;

– определить оптимальное количество термов для каждой входной лингвистической переменной;

– разработать систему поддержки принятия решений при отборе игрока в футбольную команду в среде программирования Matlab Fuzzy Logic Toolbox;

– получить выходные данные и сделать по ним вывод о возможности включения футболиста в состав команды (о соответствии футболиста требуемым профессиональным качествам).

Разработка системы выбора игроков в футбольную команду

Современный этап развития цифровых технологий характеризуется широким спектром возможностей, позволяющих упростить многие жизненные процессы, в том числе и производственные. Так, нечеткая логика и нечеткие множества вкупе со специализированным программным обеспечением позволяют создавать экспертные системы, а также системы управления и т. п.

В проведенном исследовании использован подход к отбору персонала, рассмотренный в [3, 4], адаптированный под решение рассматриваемой проблемы. Таким образом, в статье разработана система поддержки принятия решений при отборе игроков в футбольную команду, которая осуществляет выбор наиболее подходящего футболиста для команды, оперируя при этом исключительно качественными входными данными.

Разработка такой системы является трендовым направлением, а в будущем, при условии высоких показателей эффективности, она может быть внедрена в производственный процесс.

Система нечеткого вывода построена на основе алгоритма Мамдани [8, 9]. Выбор именно этого алгоритма обусловлен тем, что он работает по принципу «черного ящика». Входные данные поступают в виде количественных значений, аналогично и выходные. Аппарат нечеткой логики применяется на промежуточных этапах. Таким образом, получаем систему, которая принимает и выдает более понятные для пользователей числовые значения, а также проводит соответствующий анализ, интерпретируя перед этим количественные данные в качественные. Тем самым повышается эффективность этой системы по сравнению с ситуацией,

когда система анализировала бы числовые данные [10–12].

Алгоритм Мамдани включает в себя этапы, представленные на рис. 1.

Каждый этап имеет свое назначение:

1. Формирование базы правил – составление некоторого множества качественных правил, с помощью которых будет строиться дальнейший анализ. Правило состоит из условий, заключения, а также лингвистических переменных – входных, если они находятся в условиях и выходных, если в заключении.

2. Фаззификация – на этом этапе на вход поступает база правил и входные данные, происходит процесс приведения к нечеткости, т. е. нахождение значений истинности для всех подусловий из базы правил.

3. Агрегирование подусловий – обобщение всех подусловий правила и определение степени истинности условий для каждого правила системы нечеткого вывода.

4. Активизация подзаключений – на данном этапе осуществляется переход от условий к подзаключениям.

5. Аккумуляция подзаключений – цель текущего этапа: получение нечеткого множества с функцией принадлежности для каждой выходной переменной.

6. Дефаззификация – получение числовых значений для каждой выходной лингвистической переменной [13, 14].

Определение входных и выходных параметров нечеткой модели

В [5] проведен обзор данных на базе реального футбольного клуба из Малайзии FC Universiti Sains. В качестве инструментария разработки системы поддержки принятия решений использовалось собственное программное обеспечение, разработанное на языке C#. Входными параметрами выбраны десять различных навыков футболиста:

- самообладание;
- запас сил;
- физическое состояние;
- интеллект;
- интуиция;
- ловкость;
- выносливость;
- командная работа;
- видение поля;
- скорость.

Терм-множество каждой лингвистической переменной содержит семь элементов:

- «отлично»;
- «очень хорошо»;
- «хорошо»;
- «среднее»;
- «ниже среднего»;
- «плохо»;
- «очень плохо».

В настоящей работе инструментом разработки системы поддержки принятия решений об отборе игрока в футбольную команду выступает среда программирования Matlab Fuzzy Logic Toolbox. В качестве входных параметров модели выбраны четыре наиболее значимых навыка для футболистов [15, 16].

При оценке качеств футболистов для последующего отбора в команду наиболее пристальное внимание обращается на физическое состояние (готовность футболиста играть весь матч целиком), интеллект (понимание тактики команды соперника и указаний главного тренера), командную работу (взаимодействие с партнерами по команде) и скорость (скорость принятия решения). Как говорилось ранее, данные будут отображаться качественно, поскольку они

имеют преимущество в точности.

Так как целью разработки системы поддержки принятия решений является оценка качеств футболиста и его последующий отбор в состав команды, то в качестве выходного параметра следует выбрать рейтинг футболиста по 100-балльной шкале. В качестве входных параметров выбраны: физическое состояние, интеллект, командная работа, скорость работы.

В данной модели принято входные параметры оценивать в относительных единицах, поэтому их диапазон варьирования лежит от 0 до 1.

Так как оценку физических, интеллектуальных и командных характеристик претендентов в футбольную команду осуществляют тренеры, а согласно [17] человеческий мозг хорошо воспринимает и обрабатывает информацию, содержащую три-четыре степени сравнения, опишем каждую из лингвистических переменных, включая выходную, четырьмя терминами:

- «отлично»;
- «хорошо»;
- «удовлетворительно»;
- «плохо».

Каждый из термов имеет свой диапазон изменения: «отлично» – 0,74–1; «хорошо» –



Рис. 1. Схема этапов нечеткого вывода

Fig. 1. Scheme of stages of fuzzy inference

Таблица 1. Сравнительный анализ основных моментов исследований

Table 1. Comparative analysis of research highlights

Показатель Indicator	Исследование Research	
	Источник [5] Source	Авторское Author's
Математическая модель Math model	Алгоритм Мамдани Mamdani's algorithm	Алгоритм Мамдани Mamdani algorithm
Инструментарий Tools	Собственное программное обеспечение, разработанное на C# Proprietary software developed on C#	Среда программирования Matlab Fuzzy Logic Toolbox Programming environment Matlab Fuzzy Logic Toolbox
Количество входных параметров Number of input parameters	10	4
Количество термов в терм-множестве каждой лингвистической переменной The number of terms in the term set of each linguistic variable	7	4

0,49–0,75; «удовлетворительно» – 0,24–0,51; «плохо» – 0–0,25.

Все перечисленные термы лингвистических переменных представлены в треугольном виде и находятся в указанных диапазонах изменения.

Для наглядного представления различий исследования, представленного в [5], и проведенного авторами, составим сравнительную табл. 1, в

которой отражены основные моменты проведенных научных исследований.

Далее представлено одно из окон системы поддержки принятия об отборе игрока в футбольную команду с четырьмя входными и одной выходной лингвистическими переменными в среде программирования Matlab Fuzzy Logic Toolbox (рис. 2).

Содержимое каждой лингвистической

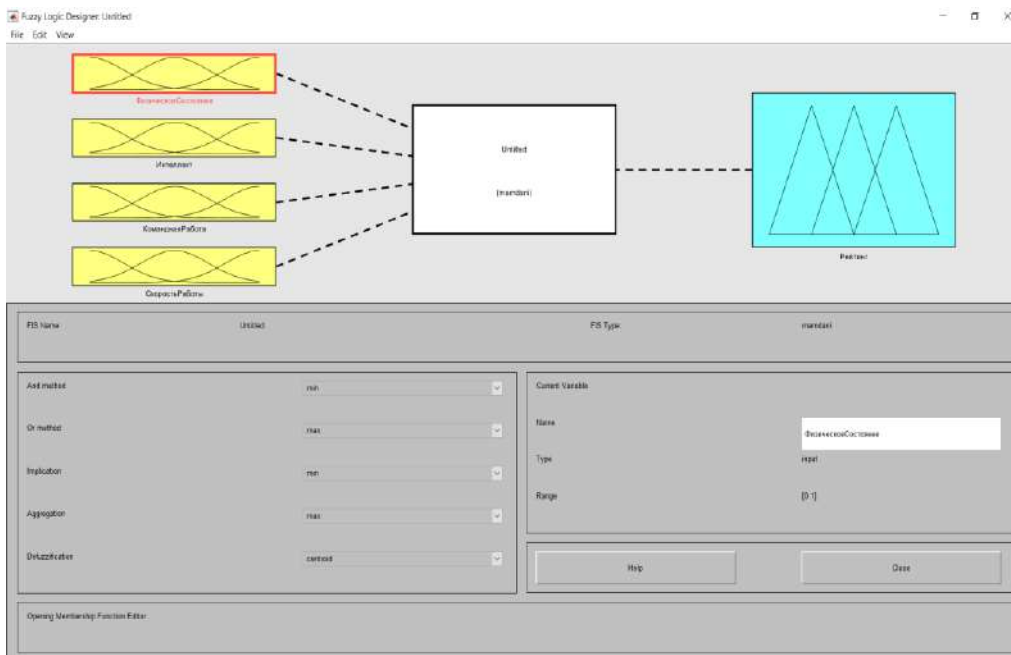


Рис. 2. Окно схемы системы нечеткой логики
Fig. 2. Fuzzy logic system diagram window

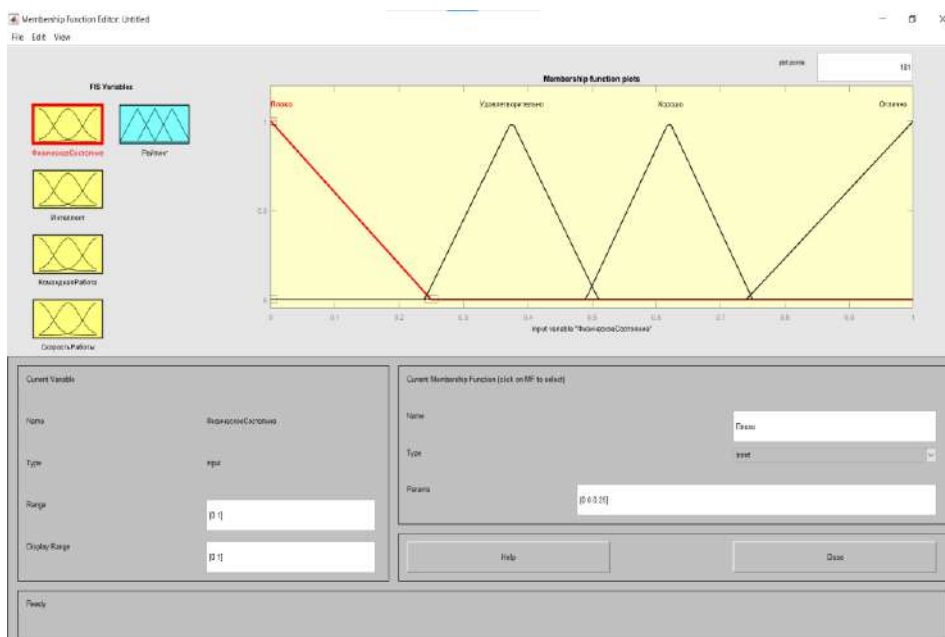


Рис. 3. Окно редактора функции принадлежности
Fig. 3. Membership function editor window

переменной в разработанной системе поддержки принятия решений, а именно четвертая терма, составляется в окне редактора функции принадлежности (рис. 3). Также задается диапазон значений, в котором переменная будет определяться.

Формирование правил работы нечеткой системы

Необходимо сформулировать правила работы нечеткой системы на базе собранных данных [18–20]. Если физическое состояние футболиста оценивается как отличное, а интеллект и

работа в команде имеют высокий уровень, то и рейтинг футболиста котируется в пределах терма «отлично».

Для наилучшей работы системы отбора футболистов создано 128 нечетких правил, сформулированных на мнениях экспертов. База нечетких правил составлена с учетом всевозможных характеристик футболиста, что гарантирует приемлемое качество будущей модели (табл. 2).

В окне редактора просмотра правил есть возможность добавить правила, а также просмотреть текущие (рис. 4). Следует обратить

Таблица 2. Нечеткие правила вывода
Table 2. Fuzzy inference rules

№	Физическое состояние Physical state	Интеллект Intellect	Командная работа	Скорость работы Work speed	Рейтинг
1	Отлично Excellent	Хорошо Good	Хорошо Good	–	Хорошо Good
2	Хорошо Good	Отлично Excellent	Плохо Bad	–	Хорошо Good
3	Отлично Excellent	Хорошо Good	–	Отлично Excellent	Отлично Excellent
4	Отлично Excellent	Удовлетворительно Satisfactory	Хорошо Good	–	Хорошо Good
...
127	–	Хорошо Good	Плохо Bad	Удовлетворительно Satisfactory	Удовлетворительно Satisfactory
128	–	Плохо Bad	Плохо Bad	Плохо Bad	Плохо Bad

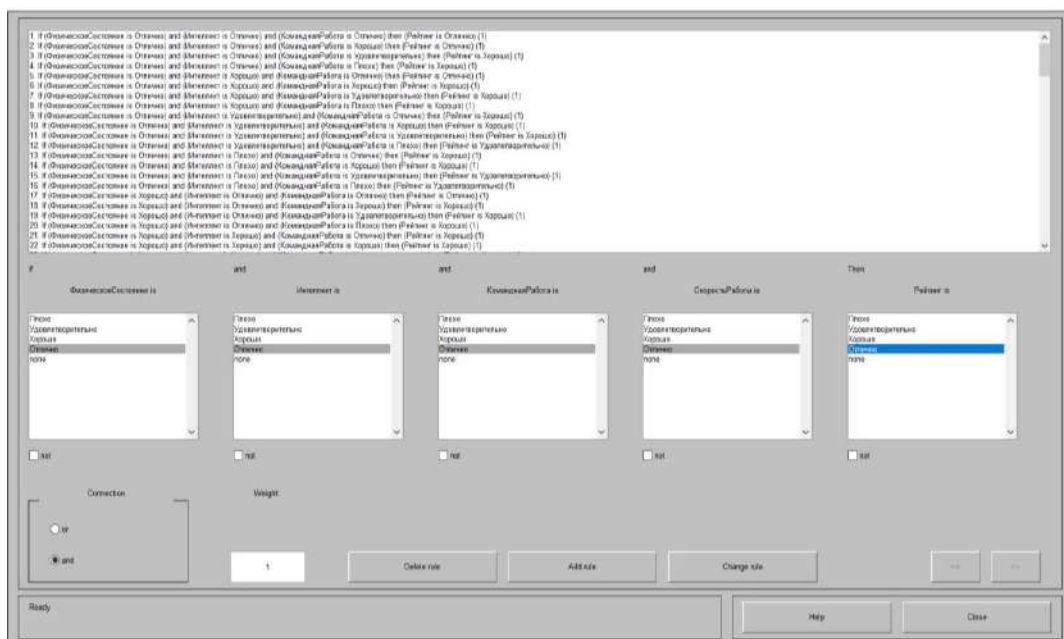


Рис. 4. Просмотр редактора правил
Fig. 4. Viewing the Rules Editor

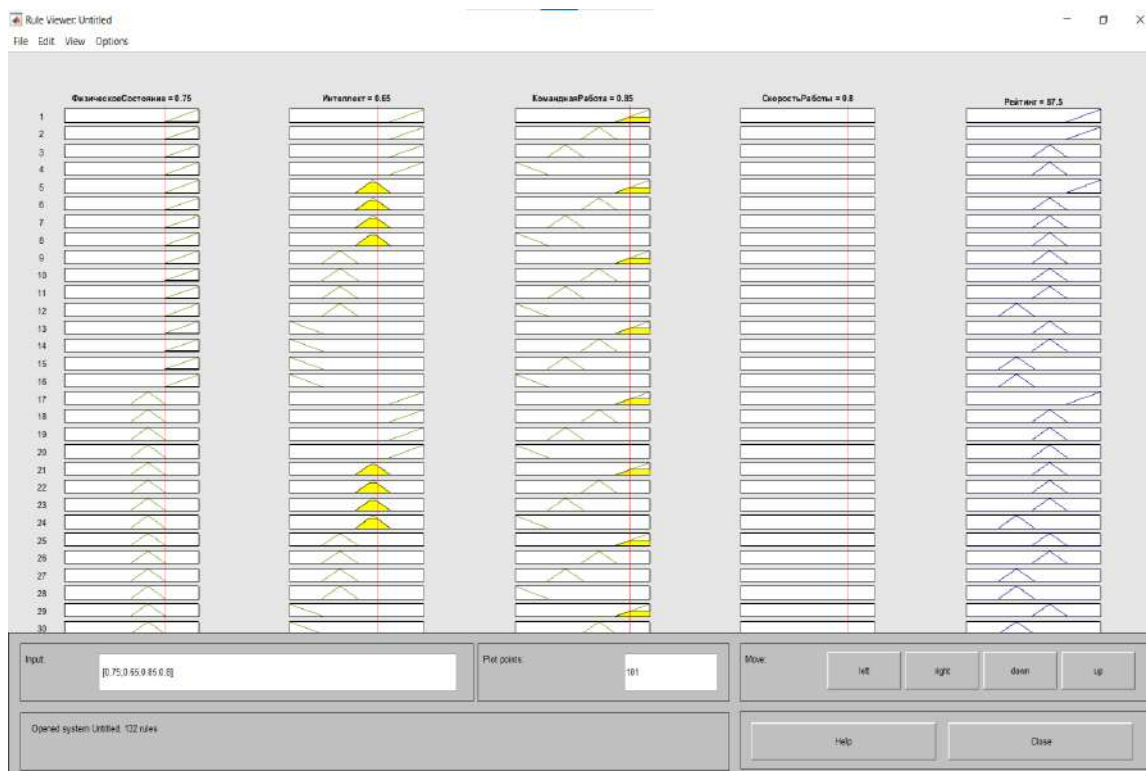


Рис. 5. Просмотр логических правил в редакторе
Fig. 5. Viewing Boolean Rules in the Editor

внимание, что все подусловия каждого правила соединены оператором в логическое «и», т. е. правило истинно при условии истинности всех подусловий правила.

Окно просмотра правил сформированы в редакторе Matlab (рис. 5). В окне можно посмотреть рейтинг футболиста на основе входных параметров. Например, в случае, если физическое состояние спортсмена оценивается в 0,75, интеллект равен 0,65, работа в команде – 0,85, а скорость работы – 0,8, то рейтинг значится на отметке 87,5. Данный факт свидетельствует о том, что футболист достаточно неплохого качества и с большой вероятностью будет включен главным тренером в состав команды.

В проведенном исследовании, ориентированном на разработку нечеткой системы поддержки принятия решения при отборе футболистов в футбольную команду на предсезонных сборах, используется алгоритм Мамдани [11, 21, 22], реализуемый формулой:

$$\mu'(y) = \min \{c_i, \mu(y)\} \quad (1)$$

где $\mu'(y)$ – «активизированная» функция принадлежности; $\mu(y)$ – функция принадлежности термина; c_i – степень истинности i -го подзаключения.

В источниках [11, 21] формулу (1) приня-

то называть \min -активацией, поскольку она позволяет вычислять степень истинности для каждого подзаключения $c_i = d_i \cdot F_i$, где $i = 1 \dots q$. Далее каждое i -е подзаключение сопоставляется с соответствующим множеством D_i с новой функцией принадлежности. Она вычисляется как минимум из c_i и значения функции принадлежности термина из подзаключения.

Апробация разработанной модели

Разработанная система поддержки принятия решений для отбора игроков в футбольную команду основана на теории нечетких множеств [23–25] и нечеткой логике [26–29], где основой является алгоритм Мамдани. В рамках реализации выбранного подхода модель оперирует исключительно качественными данными, что дает преимущество перед количественными данными в точности результатов.

Исследуем модель по таким параметрам, как физическое состояние, интеллект, рейтинг. Так, можно сделать следующий вывод: чем выше показатели указанных параметров, тем выше рейтинг футболиста. К примеру, если установить порог прохода в команду около 60 баллов, необходимо, как минимум обладать высоким интел-

лектом ($> 0,75$), но при этом показатели физического состояния допустимо невысокие ($< 0,5$) и, наоборот, нужно иметь отличное физическое состояние ($> 0,75$), однако показатели интеллекта могут быть небольшими ($< 0,5$).

Визуализация модели нечеткого вывода также может быть произведена в среде разработки Matlab Fuzzy Logic Toolbox, позволяющей упростить процедуру выбора потенциальных игроков в футбольную команду на предсезонных сборах (рис. 6).

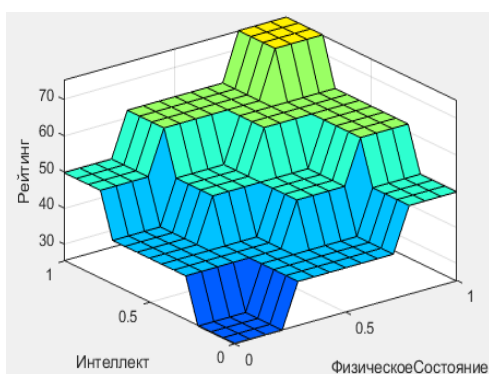


Рис. 6. Характеристика нечеткого регулятора по интеллекту и физическому состоянию

Fig. 6. Characteristics of the fuzzy controller in terms of intelligence and physical condition

Заключение

В результате проведенного исследования разработана система поддержки принятия реше-

ния отбора наиболее перспективных игроков в футбольную команду в рамках предсезонных сборов. В качестве основного инструментального средства выбран алгоритм нечеткой логики Мамдани, реализуемый в среде программирования Matlab Fuzzy Logic Toolbox. Построенная нечеткая модель апробирована на имеющихся данных о характеристиках игроков. Полученные результаты могут быть разобраны и учтены главным тренером перед финальным решением о включении игрока в футбольную команду.

Примененный в проведенном исследовании подход к процессу отбора игроков в футбольную команду позволяет существенно увеличить процент качественных и наиболее подходящих клубу игроков, а также снизить нагрузку на главного тренера в этом вопросе. Освободившееся время тренер может использовать для составления плана мероприятий, направленных на формирование конкурентных преимуществ футбольного клуба: больше времени уделять на разработку оптимальных стратегий игры, детальнее изучать опыт других клубов.

Внедрение разработанной системы поддержки принятия решений об отборе игроков в футбольную команду призвана способствовать формированию положительного имиджа футбольного клуба.

Список литературы

1. Численность вышедших работников с начала года // Витрина статистических данных : сайт. URL: <https://showdata.gks.ru/report/273216/> (Дата обращения: 16.11.2022).
2. Никонорова А.В., Торопова Н.Н. Проблемы и способы повышения эффективности при осуществлении процесса отбора персонала // Вестник РГГУ. Сер. Экономика. Управление. Право. 2018. № 3 (13). С. 90–102.
3. Ибрагимов А.У., Ибрагимова Л.А., Каравасва М.В. Оценка компетентности персонала торгового предприятия с использованием метода нечеткой логики // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2012. № 1 (32). С. 242–249.
4. Балашова И.Ю., Прошкина Е.Н. Анализ и моделирование рассуждений в интеллектуальной системе подбора персонала // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2018. № 1 (25). С. 80–88.
5. Football Player Selection Using Fuzzy Logic / M.B. Burhanuddin et al. // ASEAN Conference on Information System (ACIS2015). Malaysia, 2015. URL: <https://www.researchgate.net/publication/324411729>. (Дата обращения: 22.04.2022).
6. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2003. 736 с.
7. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М. : Горячая линия-Телеком, 2007. 288 с.
8. Болодурина И.П., Дусакаева С.Т. Введение в теорию нечетких множеств и систем. Оренбург : ОГУ, 2021. 172 с.
9. Белозерова Г.И., Скуднв Д.М., Кононова З.А. Нечеткая логика и нейронные сети. Ч. 1. Липецк : ЛГПУ. 2017. 64 с.
10. Болдырев П.А., Дусакаева С.Т. Оценка конкурентоспособности продукта или услуги в условиях нечеткой информации // Роль инноваций в трансформации современной науки : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2017. Ч. 1. С. 113–118.
11. Болодурина И.П., Болдырев П.А., Дусакаева С.Т. Методы нечеткой логики при исследовании востребованности учебной литературы // Научное обозрение. 2015. № 14. С. 224–231.
12. Болодурина И.П., Дусакаева С.Т. Моделирование процесса принятия решений при открытии нового офиса продаж сотовой связи в нечетких условиях // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений : тр. VIII Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Уфа, 2020. Т. 1. С. 15–18.
13. Болодурина И.П., Дусакаева С.Т. Совершенствование управления востребованностью учебной литературы на основе применения модели Леунга разделения на зоны приоритетности дисциплин в нечетких условиях // Планирование, проведение и интерпретация научно-технических исследований : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. Казань, 2020. С. 6–10.

14. Duboi D., Prade H.M. Fuzzy sets and systems: theory and applications. New York ; London ; Toronto : Academic Press., 1980. 393 p.
15. The top 5 qualities to become a professional football player // The international center of European football : site. URL: <https://europe.theicef.com/the-top-5-qualities-to-become-a-professional-football-player/> (Дата обращения: 16.11.2022).
16. Canever B. Lionel Messi: 5 Qualities That Make Him the World's Greatest Footballer // Bleacher Report : site. URL: syndication.bleacherreport.com (Дата обращения: 16.11.2022).
17. Барабанщиков В.А. Общая психология: психология восприятия. М. : Юрайт, 2022. 184 с.
18. Duboi D., Prade H.M. Possibility theory and formal concept analysis: Characterizing independent sub-contexts // Fuzzy Sets and Systems. 2012. Vol. 196. Pp. 4–16.
19. Duboi D. The role of fuzzy sets in decision sciences: Old techniques and new directions // Fuzzy Sets and Systems. 2011. Vol. 184 (1). Pp. 3–28.
20. Зак Ю.А. Многокритериальные задачи математического программирования с размытыми ограничениями. Математические модели схем компромисса. Выбор решений из конечного множества альтернатив // Кибернетика и системный анализ. 2010. № 5. С. 80–89.
21. Киселев В.Ю., Калугина Т.Ф. Теория нечетких множеств и нечеткая логика. Задачи и упражнения. Иваново : ИГЭУ, 2019. 72 с.
22. Тихомирова А.Н., Клейменова М.Г. Нечеткие модели дискретной математики. М. : НИЯУ МИФИ, 2011. 108 с.
23. Хижняков Ю.Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени. Пермь : ПНИПУ, 2013. 156 с.
24. Хижняков Ю.Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление. Пермь : ПНИПУ, 2013. 303 с.
25. Бахусова Е.А. Элементы теории нечетких множеств. Тольятти : ТГУ, 2013. 116 с.
26. Зак Ю.А. Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных: Fuzzy-Технологии. М. : Либроком, 2013. 352 с.
27. Frank H. Fuzzy Methoden in der Wirtschaftsmathematik. Braunschweig ; Wiesbaden : Vieweg & Sohn Verlag, 2002. 242 p.
28. Friedrich A. Logik und Fuzzy-Logik. Stuttgart : Expert Verlag, 2006. 319 p.
29. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. Прикладные нечеткие системы. М. : Мир, 1993. 368 с.

References

1. Vitrina statisticheskikh dannykh. Chislennost' vybyvshikh rabotnikov s nachala goda (Elektronnyi resurs) [Statistical data showcase. Number of retired employees since the beginning of the year (Electronic resource)]. Available at: <https://showdata.gks.ru/report/273216/> (Accessed November 16, 2022).
2. Nikonorova A.V., Toropova N.N. Problemy i sposoby povysheniia effektivnosti pri osushchestvlenii protsessa otbora personala [Problems and ways to improve efficiency in the implementation of the personnel selection process]. *Vestnik RGGU. Seriya «Ekonomika. Upravlenie. Pravo»* [Bulletin of the Russian State University for the Humanities. Series «Economics. Management. Right»], 2018, no. 3 (13), pp. 90–102.
3. Ibragimov A.U., Ibragimova L.A., Karavaeva M.V. Otsenka kompetentnosti personala torgovogo predpriyatiya s ispol'zovaniem metoda nechetkoi logiki [Assessment of the competence of the personnel of a trading enterprise using the fuzzy logic method]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)* [Bulletin of the Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev (National Research University)], 2012, no. 1 (32), pp. 242–249.
4. Balashova I.Yu., Proshkina E.N. Analiz i modelirovanie rassuzhdenii v intellektual'noi sisteme podbora personala [Analysis and modeling of reasoning in the intellectual system of personnel selection]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society], 2018, no. 1 (25), pp. 80–88.
5. Burhanuddin M.B. et al. Football Player Selection Using Fuzzy Logic. ASEAN Conference on Information System (ACIS2015). Malaysia, 2015. URL: <https://www.researchgate.net/publication/324411729>. (Accessed April 22, 2022).
6. Leonenkov A.V. Nечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH]. Saint Petersburg: BHV-Petersburg Publ., 2003. 736 p.
7. Shtovba S.D. Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB [Design of fuzzy systems using MATLAB]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2007. 288 p.
8. Bolodurina I.P., Dusakaeva S.T. Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv i sistem [Introduction to the theory of fuzzy sets and systems]. Orenburg: OGU Publ., 2021. 172 p.
9. Belozerova G.I., Skudnev D.M., Kononova Z.A. Nечеткая логика и нейронные сети (v 2 chastyakh). Chast' 1. [Fuzzy logic and neural networks (in 2 parts). Part 1]. Lipetsk: LGPU, 2017. 64 p.
10. Boldyrev P.A., Dusakaeva S.T. Otsenka konkurentosposobnosti produkta ili uslugi v usloviyakh nechetkoi informatsii [Assessment of the competitiveness of a product or service in conditions of fuzzy information]. *Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Rol' innovatsii v transformatsii sovremennoi nauki»* [Proceedings of the International scientific-practical conference «The role of innovation in the transformation of modern science»]. Ufa, 2017, part 1, pp. 113–118.
11. Bolodurina I.P., Boldyrev P.A., Dusakaeva S.T. Metody nechetkoi logiki pri issledovanii vostrebovannosti uchebnoi literatury [Methods of fuzzy logic in the study of the demand for educational literature]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2015, no. 14, pp. 224–231.
12. Bolodurina I.P., Dusakaeva S.T. Modelirovanie protsessa prinyatiya reshenii pri otkrytii novogo ofisa prodazh sotovoi svyazi v nechetkikh usloviyakh [Modeling the decision-making process when opening a new cellular sales office in fuzzy conditions]. *Trudy VIII Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Informatsionnye tekhnologii intellektual'noi podderzhki prinyatiya reshenii» (s priglazheniem za-*

rubezhnykh uchenykh): v 2 tomakh [Proceedings of the VIII All-Russian scientific conference «Information technologies for intellectual decision support» (with the invitation of foreign scientists): in 2 volumes]. Ufa, 2020, vol. 1, pp. 15–18.

13. Bolodurina I.P., Dusakaeva S.T. Sovershenstvovanie upravleniya vostrebovanost'yu uchebnoi literatury na osnove primeneniya modeli Leunga razdeleniya na zony prioritnosti distsiplin v nechetkikh usloviyakh [Improving the management of the demand for educational literature based on the application of the Leung model of division into priority zones of disciplines in fuzzy conditions]. *Sbornik statei po itogam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Planirovanie, provedenie i interpretatsiya nauchno-tehnicheskikh issledovaniy»* [Proceedings on the results of the international scientific and practical conference «Planning, conducting and interpreting scientific and technical research»]. Kazan, 2020, pp. 6–10.

14. Duboi D., Prade H.M. Fuzzy sets and systems: theory and applications. New York ; London ; Toronto : Academic Press., 1980. 393 p.

15. The top 5 qualities to become a professional football player. The international center of European football : site. URL: <https://europe.theicf.com/the-top-5-qualities-to-become-a-professional-football-player/> (Accessed November 16, 2022).

16. Canever B. Lionel Messi: 5 Qualities That Make Him the World's Greatest Footballer. Bleacher Report : site. URL: [syndication.bleacherreport.com](https://www.bleacherreport.com) (Accessed November 16, 2022).

17. Barabanshchikov V.A. Obshchaya psikhologiya: psikhologiya vospriyatiya [General psychology: psychology of perception]. Moscow: Yurait Publ., 2022. 184 p.

18. Duboi D., Prade H.M. Possibility theory and formal concept analysis: Characterizing independent sub-contexts. *Fuzzy Sets and Systems*, 2012, vol. 196, pp. 4–16.

19. Duboi D. The role of fuzzy sets in decision sciences: Old techniques and new directions. *Fuzzy Sets and Systems*, 2011, vol. 184 (1), pp. 3–28.

20. Zak Yu.A. Mnogokriterial'nye zadachi matematicheskogo programmirovaniya s razmytymi ogranicheniyami. Matematicheskie modeli skhem kompromissa. Vybory reshenii iz konechnogo mnozhestva al'ternativ [Multicriteria problems of mathematical programming with fuzzy constraints. Mathematical models of compromise schemes. Choice of solutions from a finite set of alternatives]. *Kibernetika i sistemnyi analiz* [Cybernetics and system analysis], 2010, no. 5, pp. 80–89.

21. Kiselev V.Yu., Kalugina T.F. Teoriya nechetkikh mnozhestv i nechetkaya logika. Zadachi i uprazhneniya [Fuzzy set theory and fuzzy logic. Tasks and exercises]. Ivanovo: IGEU Publ., 2019. 72 p.

22. Tikhomirova A.N., Kleimenova M.G. Nechetkie modeli diskretnoi matematiki [Fuzzy models of discrete mathematics]. Moscow: NIYAU MIFI Publ., 2011. 108 p.

23. Khizhnyakov Yu.N. Algoritmy nechetkogo, neuronnogo i neuro-nechetkogo upravleniya v sistemakh real'nogo vremeni [Algorithms of fuzzy, neural and neuro-fuzzy control in real-time systems]. Perm': PNIPU Publ., 2013. 156 p.

24. Khizhnyakov Yu.N. Nechetkoe, neuronnoe i gibridnoe upravlenie [Fuzzy, neural and hybrid control]. Perm': PNIPU Publ., 2013. 303 p.

25. Bakhusova E.A. Ee elementy teorii nechetkikh mnozhestv [Elements of the theory of fuzzy sets]. Tol'yatti: TGU Publ., 2013. 116 p.

26. Zak Yu.A. Prinyatie reshenii v usloviyakh nechetkikh i razmytykh dannykh [Decision making in conditions of fuzzy and fuzzy data: Fuzzy-Technologies]. Moscow: Librokom Publ., 2013. 352 p.

27. Frank H. Fuzzy Methoden in der Wirtschaftsmathematik. Braunschweig ; Wiesbaden : Vieweg & Sohn Verlag, 2002. 242 p.

28. Friedrich A. Logik und Fuzzy-Logik. Stuttgart : Expert Verlag, 2006. 319 p.

29. Terano T., Asai K., Sugeno M. Prikladnye nechetkie sistemy [Applied fuzzy systems]. Moscow: Mir Publ., 1993. 368 p.

Информация об авторах

Дусакаева Слушаи Тугайбаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; e-mail: slushashdusakaeva@rambler.ru.

Хохлов Иван Артурович, кафедра прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; e-mail: iv.hohlov-01@yandex.ru.

Нирян Павел Леонидович, кафедра прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; e-mail: niran908@gmail.com.

Носарев Максим Павлович, кафедра прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; e-mail: nosarev11082001@gmail.com.

Information about the authors

Slushash T. Dusakaeva, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg; e-mail: slushashdusakaeva@rambler.ru.

Ivan A. Khokhlov, Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg; e-mail: iv.hohlov-01@yandex.ru.

Pavel L. Niryan, Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg; e-mail: niran908@gmail.com.

Maxim P. Nosarev, Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg; e-mail: nosarev11082001@gmail.com.

Общие подходы к управлению социальной системой «сотрудник подразделения транспортной безопасности – физ. лицо (или группа физ. лиц)», участвующие в процессе обеспечения транспортной безопасности

А.В. Лившиц✉, **Д.В. Буторин**, **Н.Г. Филиппенко**, **А.Н. Горобец**, **А.А. Александров**
Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация
✉livnet@list.ru

Резюме

Статья посвящена формированию общих подходов при определении управляющих воздействий на социальную систему «сотрудник подразделения транспортной безопасности – физ. лицо (или группа физ. лиц), участвующие в процессе обеспечения транспортной безопасности, учитывающую конфликтные ситуации, возникающие в процессе выполнения сотрудниками подразделений своих функций, их развитие, разрешение в целях достижения необходимого результата – выполнение требований в области обеспечения транспортной безопасности. Принимая во внимание, что к социальным системам применимы фундаментальные принципы теории управления, носящие общий характер, предлагаемая социальная система рассматривается как объект управления. Система управления функционированием подразделений транспортной безопасности, учитывающая конфликтные ситуации, является комбинированной системой, сочетающей в себе два принципа управления – по отклонению и по возмущению. В работе рассмотрены условия однозначности представления системы управления в виде правовых, технических и других ограничений. Предложены два направления формирования управляющих воздействий – рекомендации правового и психолого-поведенческого характера. Первое направление будет реализовано путем создания комплекса рекомендаций сотрудникам подразделений транспортной безопасности, способствующих осуществлению ими функций обеспечения требований транспортной безопасности (выдержки из нормативных и организационно-распорядительных документов, формирующие понимание законности требований, предъявляемых к физическим лицам, участвующим в исполнении функций подразделений транспортной безопасности). Рекомендации второго направления непосредственно связаны с психологическими характеристиками участвующих в конфликтной или нештатной ситуации.

Ключевые слова

комбинированная система управления, социальная система, транспортная безопасность, рекомендации, конфликтная ситуация, принципы управления

Для цитирования

Общие подходы к управлению социальной системой «сотрудник подразделения транспортной безопасности – физ. лицо (или группа физ. лиц)», участвующие в процессе обеспечения транспортной безопасности / А.В. Лившиц, Д.В. Буторин, Н.Г. Филиппенко, А.Н. Горобец, А.А. Александров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 238–249. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).238-249.

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 25.10.2022 г.; принята к публикации: 27.10.2022 г.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по государственной работе «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Особенности психологии поведения сотрудников подразделения транспортной безопасности в повседневной деятельности и нештатных ситуациях» № 122040800064-9 от 14.04.2022 г., руководитель Валерий Александрович Чичкалюк.

General approaches to the management of the social system «Employee of the transport Safety Unit – Individual (group of individuals)» participating in the process of ensuring transport security

A.V. Livshits✉, **D.V. Butorin**, **N.G. Filippenko**, **A.N. Gorobets**, **A.A. Alexandrov**
Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation
✉livnet@list.ru

Abstract

The article is devoted to the formation of common approaches in determining the control impacts on the social system "Employee of the transport security unit - an individual (a group of individuals) involved in the process of ensuring transport security", taking into account conflict situations that arise in the process of implementation by employees of departments their functions, their development, resolution in order to achieve the desired result - the fulfillment of requirements in the field of ensuring transport security. Taking into account that the fundamental principles of management theory, which are of a general nature, are applicable to social systems, the proposed social system is considered as an object of management. The control system for the of transport security units functioning, conflict situations considered, is presented as an integrated control system combining two principles - control by deviation and control by disturbance. The article considers the conditions for the uniqueness of the presented control system in the form of legal, technical and other restrictions. Two directions for the formation of control actions are proposed in the form of recommendations of a legal and psychological-behavioral nature. The first direction will be implemented by forming a set of recommendations to the employee of transport security units, contributing to the implementation of the functions of ensuring transport security requirements, in the form of excerpts from regulatory, organizational and administrative documents that form an understanding of the legality of the requirements for individuals participating in the performance of the functions of transport security units. The recommendations of the second direction are related to the psychological characteristics of those involved in a conflict or emergency situation.

Keywords

combined management system, social system, transport security, recommendations, conflict situation, management principles

For citation

Livshits A.V., Butorin D.V., Filippenko N.G., Gorobets A.N., Alexandrov A.A. Obshchie podkhody k upravleniyu sotsial'noi sistemoi «sotrudnik podrazdeleniya transportnoi bezopasnosti – fiz. litso (ili gruppa fiz. lits)», uchastvuyushchie v protsesse obespecheniya transportnoi bezopasnosti [General approaches to the management of the social system «Employee of the transport Safety Unit – individual (group of individuals)» participating in the process of ensuring transport security]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 238–249. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).238-249.

Article Info

Received: October 10, 2022; Revised: October 25, 2022; Accepted: October 27, 2022

Acknowledgement

The work was carried out within the framework of the state task on state work «Conducting applied scientific research» on the topic «Features of the psychology of behavior of employees of the transport security unit in everyday activities and emergency situations» No. 122040800064-9 14.04.2022, head Valery Alexandrovich Chichkalyuk.

Введение

При практической реализации мероприятий по обеспечению транспортной безопасности (ТБ) силами подразделений транспортной безопасности отмечается большое количество нештатных ситуаций, в том числе конфликтные ситуации при проведении досмотровых мероприятий, осуществлении пропускного и внутриобъектового режимов объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств железнодорожного транспорта и т. п. Адекватность выбора поведенческого алгоритма сотрудниками подразделений ТБ во многом детерминирует как эффективность проводимых мероприятий, так и их протекание в правовом поле [1–4]. Без конкретных поведенческих умений и навыков выполнение указанного крайне затруднено, более того, приводит к репутационным и финансовым потерям.

Таким образом, разработка рекомендаций для сотрудников подразделений ТБ, регламентирующих их поведение при возникновении

нештатных и экстремальных ситуаций в соответствии с действующим законодательством, направленных на решение задач обеспечения транспортной безопасности на железнодорожном транспорте, является относительно новым и весьма актуальным направлением работы.

Постановка задачи

Оценку, предупреждение и разрешение экстремальных и нештатных ситуаций можно рассматривать в виде процесса управления сложной социальной системой. К подобным системам применимы фундаментальные принципы теории управления, носящие общий характер [5].

Очевидно, что мы имеем дело, с одной стороны, с организационно-административными методами управления при обеспечении выполнения требований транспортной безопасности, а с другой – с социально-психологическими методами управления, направленными на мотивацию (формирование) социально приемлемого поведения.

Цель настоящей статьи состоит в определении подходов к построению системы управления функционированием подразделений ТБ (ПТБ), во многообразии накладываемых правовых, технических и других ограничений и формируемых управляющих воздействий.

Комбинированная система управления социальной системой

Систему управления функционированием ПТБ, учитывающую конфликтные ситуации, возникающие в процессе выполнения сотрудниками своих функций, их развитие, разрешение в целях достижения необходимого результата – выполнение требований в области ТБ $Y(t)$, можно считать комбинированной системой управления (рис. 1), сочетающей в себе два принципа управления – по отклонению и по возмущению.

В качестве объекта управления (ОУ) будем рассматривать социальную систему «сотрудник подразделения транспортной безопасности (физ. лицо или группа физ. лиц), участвующий в процессе обеспечения транспортной безопасности». В качестве такого объекта управления могут присутствовать «сотрудник, проводящий домотр + досматриваемый», «сотрудник, проводящий собеседование + физ. лицо, участвующее в собеседовании», «сотрудники группы быстрого реагирования – нарушители требований транспортной безопасности» и т. д.

Рассмотрение представленной на рис. 1 системы зависит от уровня детализации задачи. Рассматривая задачу обеспечения ТБ объекта транспортной инфраструктуры (ОТИ) в длительной перспективе, мы имеем дело со следящей системой, где качество управления, выявления нештатных ситуаций, обеспечение выполнения требований ТБ во многом зависят от

функционирования как различных категорий сил обеспечения ТБ, так и функционирования технических средств ТБ. В случае рассмотрения процесса реализации конкретной функций ПТБ в соответствии с требованиями, предъявляемыми к ОТИ или транспортному средству (ТС), мы имеем дело с системой программного управления, алгоритмическая последовательность функционирования которой определяется задающим устройством (ЗУ) – планом обеспечения ТБ ОТИ, паспортом объекта (ТС), организационно-распорядительными документами подразделения ТБ и т. д. Остановимся на данном уровне детализации.

Управляющее устройство (УУ) в нашем случае представляет собой систему организации управления силами обеспечения транспортной безопасности, включающую в себя организационную структуру, порядок доведения информации, подкрепленный организационно-распорядительными документами и т. д. и техническими средствами управления.

Наличие обратной связи в виде контроля исполнительской дисциплины, результатов решения поставленных задач позволяет обеспечить рациональное управление в плане выполнения требований в области ТБ.

Возможные конфликтные ситуации, возникающие в процессе решения задач обеспечения ТБ, учитываются как составляющие контролируемого и неконтролируемого возмущающих воздействий (F_1 и F_2 соответственно). Цель работы – минимизация неконтролируемой составляющей и формирование методического обеспечения функционирования корректирующего устройства (КУ).

Управляющее воздействие \bar{U} , задающее воздействие \bar{Y}_3 , возмущающие воздействия \bar{F}_1 ,

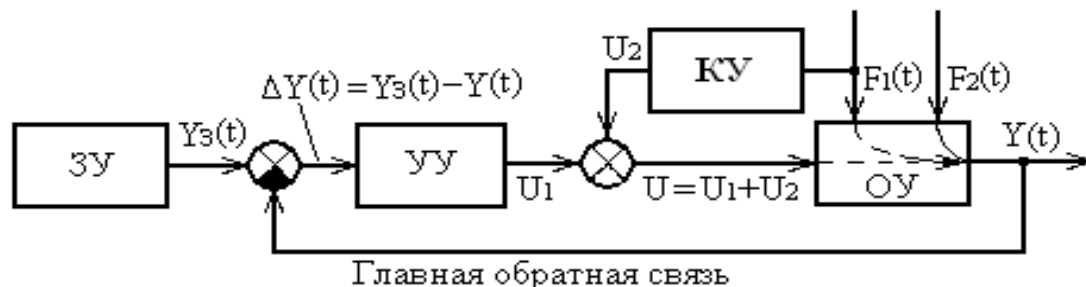


Рис. 1. Комбинированная система управления:

ЗУ – задающее устройство; УУ – управляющее устройство; ОУ – объект управления; КУ – корректирующее устройство

Fig. 1. Combined control system:

ЗУ – master device; УУ – control device; ОУ – control object; КУ – corrective device

\bar{F}_2 в общем случае представляют собой векторные величины. Например, в качестве возмущения могут выступать перечень различного рода межличностных конфликтов, техногенные и природные происшествия и др.

При этом необходимо понимать, что предлагаемое рассмотрение позволяет, с одной стороны, систематизировать подходы решения задач обеспечения ТБ, а с другой стороны, достижение адекватного результата предполагает рассмотрение социальных систем в качестве активных элементов, включающих в себя индивидов и группы, которые имеют собственные цели, взгляды, установки, определяющие выбор решений и действий [6]. Таким образом, проблемы управления социальной системой недостаточно исследовать только в рамках теории управления. Социальное управление необходимо рассматривать и как явление социокультурное и психологическое [там же] с использованием аппарата социальной психологии, политологии, психологии и социологии труда, организационной психологии, психологии личности и собственно психологии управления.

С точки зрения описания предлагаемой социальной системы, установления взаимосвязей и законов функционирования ее частей необходимо определить условия однозначности в виде начальных, граничных, геометрических, физических условий.

Условия однозначности

Для принятого уровня детализации определенный набор условий устанавливает начальные условия реализации конкретной функций ПТБ с учетом их влияния на психологическое, физическое состояние участников процесса.

Начальные условия:

1. Привлекаемые к решению задач обеспечения ТБ юридические лица.

2. Наличие у сотрудника ПТБ (в зависимости от выполняемой функции) оружия и (или) спецсредств, инженерно-технических средств обеспечения ТБ, используемых для осуществления конкретной функций ПТБ.

Граничные условия:

1. Наличие нормативных правовых и организационно-распорядительных документов, содержащих требования и порядки исполнения конкретной функций ПТБ.

2. Ограничения на ношение оружия в нерабочее время.

3. Правовые ограничения на применение физической силы, оружия.

3. Ограничения при осуществлении досмотра, дополнительного досмотра, повторного досмотра и т. д.

Геометрические условия:

1. Объект транспортной инфраструктуры, на котором осуществляется функционирование сил обеспечения ТБ, включая конфигурацию зоны ТБ и ее секторов (перевозочного, технологического, свободного доступа).

2. Размещение контрольно-пропускных пунктов и критических элементов.

Физические условия:

1. Наличие устойчивого функционального физического и психологического состояния сотрудников ПТБ. Априори принимаем данное условие в качестве необходимого.

Рассмотрим перечисленные условия однозначности более подробно.

Начальные условия

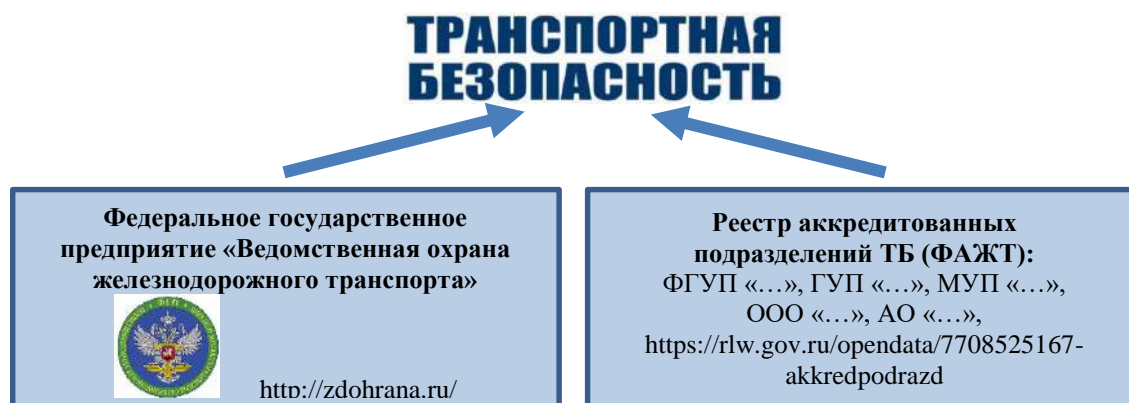
Привлекаемые к решению задач обеспечения ТБ юридические лица, рассматриваемые в качестве ПТБ, определены в первую очередь Федеральным законом «О транспортной безопасности» от 9 февраля 2007 г. № 16-ФЗ (далее – Закон № 16-ФЗ) в рамках ст. 12.3 [7].

В качестве подразделений ТБ выступают подразделения ведомственной охраны федеральных органов исполнительной власти в области транспорта и (или) аккредитованные для этой цели в установленном порядке юридические лица (Закон № 16-ФЗ ст. 1, п. 7.1) (рис. 2).

Ведомственную охрану осуществляют подразделения ФГП «Ведомственная охрана железнодорожного транспорта» (см. рис. 2). Аккредитованные в качестве подразделений ТБ юридические лица представлены в реестре указанных организаций сайта Федерального агентства железнодорожного транспорта [8] (см. рис. 2).

Федеральный закон «О ведомственной охране» от 14 апреля 1999 г. № 77-ФЗ (далее – Закон № 77-ФЗ) [9] определяет, что специальные средства, виды, типы и модели служебного огнестрельного оружия, патронов к нему, а также нормы обеспечения ими работников ведомственной охраны определяются Правительством Российской Федерации (ст. 9). Сегодня действуют следующие постановления:

1. Постановление Правительства РФ «О специальных средствах, электрошоковых

**Рис. 2.** Подразделения транспортной безопасности**Fig. 2.** Transport Security units

устройствах и искровых разрядниках, видах, типах и моделях служебного огнестрельного оружия, патронов к нему и нормах обеспечения ими работников подразделений транспортной безопасности и об утверждении Правил приобретения, хранения, ношения, учета, ремонта и уничтожения специальных средств, электрошоковых устройств и искровых разрядников, используемых работниками подразделений транспортной безопасности» от 15 ноября 2014 г. № 1209 [10].

2. Постановление Правительства РФ «О специальных средствах и огнестрельном оружии, используемых ведомственной охраной» от 30 декабря 1999 г. № 1436 (ред. от 18 января 2018 г.) [11].

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 15 ноября 2014 г. № 1209 подразделения ТБ используют:

1. Палки резиновые специальные отечественного производства.

2. Наручники отечественные.

3. Средства индивидуальной броневого защиты отечественного производства (включая жилеты и шлемы), которые не подлежат ограничению в приобретении и использовании гражданами и организациями.

4. Электрошоковые устройства и искровые разрядники отечественного производства, имеющие выходные параметры, соответствующие обязательным требованиям, установленным в соответствии с законодательством Российской Федерации о техническом регулировании.

5. Сертифицированные в установленном порядке в качестве служебного оружия:

– огнестрельное гладкоствольное и нарезное короткоствольное оружие отечественного производства;

– огнестрельное гладкоствольное длинноствольное оружие отечественного производства;

– огнестрельное оружие ограниченного поражения.

Постановление Правительства РФ от 30 декабря 1999 г. № 1436 дополнительно добавляет для ведомственной охраны в приведенный перечень средства принудительной остановки транспорта отечественного производства и служебных собак, а также детализирует перечни оружия (Постановление Правительства РФ от 15 ноября 2014 г. № 1209, разд. I п. 6):

- пистолет ИЖ-71 калибра 9×17;
- револьвер РСЛ-1 калибра 9×17;
- пистолет МР-71 калибра 9×17 (380АСР);
- пистолет ПКСК калибра 9×17 (380АСР);
- пистолет МР-471 калибра 10×23Т;
- пистолет ПСТ «Капрал» калибра 10×23Т

и патроны к этому оружию.

6. Огнестрельное гладкоствольное длинноствольное оружие калибров 12/70, 12/76, 16/70, 16/76, 20/70, 20/76, 410/76, разрешенное к обороту на территории Российской Федерации, пулевые патроны и патроны с резиновой картечью к этому оружию.

Граничные условия

ПТБ привлекаются для защиты ОТИ и ТС от актов незаконного вмешательства (АНВ) [12], при этом, согласно ст. 12 Закона № 16-ФЗ [7], к их основным функциям относятся:

1. Досмотровые мероприятия по видам досмотра:

- досмотр;
- дополнительный досмотр;
- повторный досмотр;

2. Наблюдение и собеседование.

Дополнительно к перечисленному можно добавить:

- предотвращение совершения АНВ;
- задержание;
- идентификация личности;
- передача запрещенных предметов и вещей сотрудникам органов МВД и ФСБ;
- информирование в доступной форме всех физических лиц, находящихся на объекте транспортной инфраструктуры о требованиях ТБ (Постановление Правительства РФ № 1633, п. 5о) [13].

Все указанные функции ПТБ выполняются в случаях, предусмотренных требованиями по обеспечению ТБ (ст. 8 Закон № 16-ФЗ). Из них к нормативной документации, регламентирующей деятельность на железнодорожном транспорте, относится [13–16]:

1. Постановление Правительства РФ «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищенности объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для различных категорий объектов транспортной инфраструктуры железнодорожного транспорта» от 8 октября 2020 г. № 1633.

2. Постановление Правительства РФ «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищенности объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для объектов транспортной инфраструктуры железнодорожного транспорта, не подлежащих категорированию» от 8 октября 2020 г. № 1635.

3. Постановление Правительства РФ «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, учитывающих уровни безопасности для транспортных средств железнодорожного транспорта» от 10 октября 2020 г. № 1653.

4. Постановление Правительства РФ «Об утверждении требований по соблюдению транспортной безопасности для физических лиц, следующих либо находящихся на объектах транспортной инфраструктуры или транспортных средствах, по видам транспорта» от 15 ноября 2014 г. № 1208.

Ориентируясь исключительно на деятельность ПТБ дальнейшее рассмотрение требований по обеспечению ТБ предполагается только в отношении категорируемых и не подлежащих категорированию объектов транс-

портной инфраструктуры, а также ТС железнодорожного транспорта.

При этом для исследования факторов и условий профессиональной деятельности различных категорий работников подразделений ТБ ОТИ (категорируемых и не подлежащих категорированию) и ТС железнодорожного транспорта с целью выявления перечня потенциальных экстремальных и нештатных ситуаций указанные требования в рамках данной работы были адаптированы в табличную форму с последовательным логичным отображением ужесточения обязательств к выполнению мероприятий при изменении уровня безопасности ОТИ и ТС, а также возможности сопоставления разновидностей обязательств к выполнению мероприятий по категориям категорируемых ОТИ, видам ОТИ, не подлежащих категорированию, и видам ТС.

Виды ОТИ будем рассматривать в качестве геометрического условия однозначности.

Постановление Правительства РФ от 15 ноября 2014 г. № 1209 [10] определяет ряд ограничений, связанных с ношением оружия и спецсредств, в том числе ношение работниками подразделения ТБ специальных средств, электрошоковых устройств и искровых разрядников осуществляется в период исполнения ими служебных обязанностей.

Работники подразделения ТБ при ношении специальных средств, электрошоковых устройств и искровых разрядников обязаны принять меры, исключающие возможность свободного доступа к ним посторонних лиц.

Применение физической силы, служебного огнестрельного оружия, специальных средств в соответствии с Законом № 16-ФЗ (ст. 12.3, п. 5) работниками подразделений ТБ регламентируется Законом № 77-ФЗ [9].

При применении физической силы, специальных средств или огнестрельного оружия работники ведомственной охраны обязаны (ст. 13 Закона № 77-ФЗ):

- стремиться в зависимости от характера и степени опасности преступления или административного правонарушения, степени опасности лиц, его совершивших, и силы оказываемого противодействия к тому, чтобы любой вред, причиняемый при этом, был минимальным;

- предупредить о намерении применить их, а в исключительных случаях, когда промедление с применением физической силы, специальных средств или огнестрельного оружия создает

непосредственную опасность для жизни или здоровья граждан либо работников ведомственной охраны или может повлечь иные тяжкие последствия, действовать без предупреждения;

– обеспечить лицам, получившим телесные повреждения в результате применения физической силы, специальных средств или огнестрельного оружия, первую помощь;

– доложить по подчиненности о каждом случае применения физической силы, специальных средств или огнестрельного оружия.

Соответствующие должностные лица органов ведомственной охраны обязаны незамедлительно уведомить орган внутренних дел и прокурора о каждом случае ранения или смерти в результате применения физической силы, специальных средств или огнестрельного оружия.

Превышение полномочий при применении физической силы, специальных средств или огнестрельного оружия влечет ответственность, установленную законодательством Российской Федерации.

Пределы применения физической силы (ст. 14 Закона № 77-ФЗ).

Работники ведомственной охраны имеют право на применение физической силы с целью:

– пресечения преступлений или административных правонарушений;

– задержания лиц, совершивших преступления или административные правонарушения;

– пресечения сопротивления законным требованиям работников ведомственной охраны, если иные способы не обеспечивают исполнения возложенных на них должностных обязанностей.

Работники ведомственной охраны имеют право на применение специальных средств в случаях:

– отражения нападения на охраняемые объекты;

– отражения нападения на работников ведомственной охраны или лиц, находящихся на охраняемых объектах;

– пресечения сопротивления, оказываемого правонарушителем работникам ведомственной охраны при исполнении возложенных на них должностных обязанностей;

– задержания лиц, застигнутых при совершении преступления или административного правонарушения на охраняемых объектах, если указанные лица пытаются скрыться либо имеются достаточные основания полагать, что они

намерены оказать вооруженное сопротивление работникам ведомственной охраны;

– оказания противодействия работникам ведомственной охраны при доставлении задержанных лиц в служебное помещение ведомственной охраны или орган внутренних дел;

– необходимости остановить на охраняемых объектах ТС, водитель которого не выполнил требования работников ведомственной охраны.

При необходимости работники ведомственной охраны при отсутствии специальных средств или огнестрельного оружия вправе использовать любые приемлемые подручные средства.

Запрещается применять специальные средства в отношении женщин с видимыми признаками беременности, а также лиц с явными признаками инвалидности и малолетних, за исключением случаев оказания указанными лицами вооруженного сопротивления, совершения нападения, угрожающего жизни или здоровью работников ведомственной охраны либо лиц, находящихся на охраняемых объектах.

Работники ведомственной охраны в качестве крайней меры имеют право на применение огнестрельного оружия в случаях:

– защиты лиц, находящихся на охраняемых объектах, от нападения, угрожающего их жизни или здоровью;

– отражения нападения на работников ведомственной охраны, угрожающего их жизни или здоровью, а также пресечения попытки завладеть их огнестрельным оружием;

– задержания лиц, застигнутых на охраняемых объектах при совершении тяжкого или особо тяжкого преступления против личности, охраняемых объектов и пытающихся скрыться, а также оказывающих вооруженное сопротивление работникам ведомственной охраны;

– отражения вооруженного или группового нападения на охраняемые объекты, когда иными средствами отразить указанное нападение невозможно;

– предупреждения о намерении применить огнестрельное оружие, необходимости подачи сигнала тревоги или вызова помощи;

– остановки ТС путем повреждения, если его водитель создает реальную опасность для жизни или здоровья работников охраняемых объектов либо лиц, находящихся на охраняемых объектах, а также при указанных условиях отка-

зывается остановиться либо пытается въехать на охраняемые объекты или выехать с охраняемых объектов, несмотря на законное требование работников ведомственной охраны.

Запрещается применять огнестрельное оружие при значительном скоплении людей, когда могут пострадать посторонние лица, а также в отношении женщин, лиц с явными признаками инвалидности и несовершеннолетних, когда их возраст очевиден или известен работникам ведомственной охраны, за исключением случаев, когда перечисленные лица:

– оказывают вооруженное или групповое сопротивление ведомственной охране;

– совершают вооруженное или групповое нападение на охраняемые объекты, угрожающее жизни или здоровью работников ведомственной охраны либо лиц, находящихся на охраняемых объектах.

Случаи проведения досмотровых мероприятий регламентированы требованиями по обеспечению ТБ [13–15], а правила их проведения приказом Минтранса России от 23 июля 2015 г. № 227 [17]. Запрещается применять огнестрельное оружие при значительном скоплении людей, когда могут пострадать посторонние лица, а также в отношении женщин, лиц с явными признаками инвалидности и несовершеннолетних, когда их возраст очевиден или известен работникам

ведомственной охраны, за исключением случаев, когда перечисленные лица:

– оказывают вооруженное или групповое сопротивление работникам ведомственной охраны;

– совершают вооруженное или групповое нападение на охраняемые объекты, угрожающее жизни или здоровью работников ведомственной охраны либо лиц, находящихся на охраняемых объектах.

Случаи проведения досмотровых мероприятий регламентированы требованиями по обеспечению транспортной безопасности [13–15], а правила их проведения приказом Минтранса России от 23.07.2015 г. №227 [17].

Геометрические условия

Определим территориальные ограничения осуществления функций подразделений ТБ. В соответствии с [7] подразделения ТБ осуществляют защиту ОТИ и ТС от АНВ. На рис. 3 представлена классификация объектов транспортной инфраструктуры в соответствии с нормативными и организационно-регламентирующими документами в области ТБ.

В свою очередь, организация требований в области ТБ строится с учетом понятия «зона транспортной безопасности – объект транспортной инфраструктуры, его часть (наземная, под-

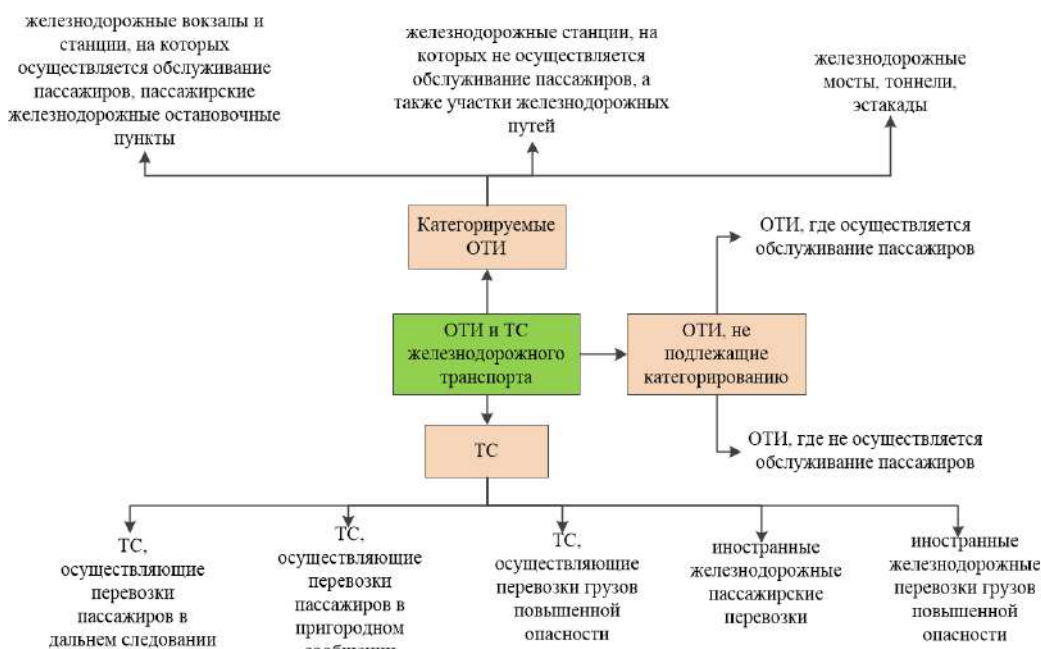


Рис. 3. Объекты транспортной инфраструктуры и транспортные средства железнодорожного транспорта

Fig. 3. Transport infrastructure facilities and railway vehicles

земная, воздушная, надводная), транспортное средство, для которых в соответствии с требованиями по обеспечению транспортной безопасности устанавливается особый режим допуска физических лиц, транспортных средств и перемещения грузов, багажа, ручной клади, личных вещей, иных материальных объектов, а также животных». Организация соблюдения требований в области ТБ в соответствии с [13–15] определяется конфигурацией секторов зоны ТБ: свободного доступа, перевозочного и технологического и критических элементов.

В связи с изложенным, свою деятельность сотрудники подразделений ТБ осуществляют на следующих территориях:

- границы зоны ТБ, в том числе контрольно-пропускные пункты;
- границы секторов зоны ТБ, в том числе контрольно-пропускные пункты на таких границах;
- территории секторов зоны ТБ;
- границы и территории критических элементов.

Вопросы обеспечения ТБ на территории зон безопасности, перечень которых утверждается Правительством Российской Федерации, в контексте данной работы не рассматривается.

Физические условия

Ранее было сказано, что при реагировании сотрудника подразделения ТБ на экстремальные и нештатные ситуации предполагается наличие у него устойчивого функционального физического и психологического состояния. При этом нельзя не понимать, что термин «состояние», обуславливающий поведение человека, представляет собой системное понятие. Психофизиологическое состояние (функциональное) – это совокупность трех составляющих: внутренние психофизиологические условия; внешняя среда (в том числе и социальная); факторы деятельности [18].

Неблагоприятное сочетание таких факторов при осуществлении функциональной деятельности сотрудников ПТБ более чем вероятно. Следовательно, при формировании инструментария решения служебных конфликтных ситуаций необходимо уделить значительное внимание формированию методических подходов по определению функционального состояния работника в течение рабочего времени, а также при продолжительном нахождении в условиях экстремальных и нештатных ситуаций.

Общие подходы к управлению социальной системой «сотрудник подразделения транспортной безопасности – физ. лицо (группа физ.лиц)», участвующие в процессе обеспечения транспортной безопасности. Формирование рекомендаций

В начале статьи рассмотрена система управления функционированием подразделений ТБ, учитывающая конфликтные ситуации, возникающие в процессе выполнения сотрудниками ПТБ своих функций, как комбинированная система управления с точки зрения теории управления.

Анализ функциональной схемы (см. рис. 1) при учете потенциальной конфликтной ситуации позволяет говорить о двух направлениях ее развития, разрешения.

Первое направление – организация главной обратной связи по отклонению от искомого результата выполнения функции ПТБ. Управляющее воздействие \bar{U}_1 в явном виде не содержит прямую информацию о развитии нештатной ситуации. Формирование характера составляющей \bar{U}_1 должно преследовать цель опосредованной компенсации, во-первых, неконтролируемого \bar{F}_2 , во-вторых, формирования исполнения реализуемой функции ПТБ.

Второе направление – организация управления по возмущению с формированием составляющей управляющего воздействия \bar{U}_2 .

Первое направление будет реализовано посредством формирования комплекса рекомендаций для сотрудников подразделений ТБ, способствующих осуществлению ими функций обеспечения требований ТБ (выдержки из нормативных и организационно-распорядительных документов, формирующих понимание законности требований, предъявляемых к физическим лицам, участвующим в исполнении функции ПТБ). Предлагаемые комплекс способствует, с одной стороны, пониманию сотрудником исполнения своих должностных обязанностей, а с другой стороны формирует его уверенность в правоте предпринимаемых действий. Его наличие позволяет обосновывать требования, предъявляемые к противоположной стороне в соответствии с психологическими рекомендациями.

Рекомендации второго направления непосредственно связаны с психологическими характеристиками участвующих в конфликтной или

нештатной ситуации.

Заключение

Предложенная система управления функционированием подразделений ТБ, учитывающая конфликтные ситуации, возникающие в процессе выполнения сотрудниками ПТБ своих функций,

позволяет рассмотреть указанный процесс во всем многообразии правовых, ситуационных ограничений и предоставляет возможность развития инструментария для формирования управляющих воздействий, в том числе на основе психолого-поведенческих рекомендаций.

Список литературы

1. Власов В.А., Травкин В. В., Гришин О.П. Анализ некоторых правовых коллизий транспортной безопасности // Право и государство: теория и практика. 2020. № 11. С. 224–228.
2. Горшков А.А. Конфликты в социально-культурных системах как источник развития и инструмент управления // Петербургский экономический журнал. 2015. № 2. С. 19–24.
3. Ирошников Д.В. Теоретические проблемы легального определения транспортной безопасности и смежных с ней категорий // Вопросы безопасности. 2020. № 1 С. 17–29.
4. Шабанов С., Алешина А. Ничего лишнего – только бизнес. Эмоциональный интеллект для достижения успеха. СПб. : Питер, 2012. 336 с.
5. Волкова В.Н., Ланкин В.Е. Применение принципов теории автоматического управления в социально-экономических системах // *π-Economy*. 2009. № 5 (85) : электрон. журн. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-principov-teorii-avtomaticheskogo-upravleniya-v-sotsialno-ekonomicheskikh-sistemah> (дата обращения: 14.05.2022).
6. Селезнева, Е. В. Психология управления. М. : Юрайт, 2022. 373 с.
7. О транспортной безопасности : Федер. закон от 09 февр. 2007 г. № 16-ФЗ : принят Гос. Думой 19 янв. 2007 г. : одобрен Советом Федерации 2 февр. 2007 г. // Собрание законодательства Российской Федерации. 2007. № 7. Ст. 837.
8. Реестр аккредитованных в качестве подразделений транспортной безопасности юридических лиц // Федеральное агентство железнодорожного транспорта : сайт. URL: <https://rlw.gov.ru/opendata/7708525167-akkredpodrazd> (Дата обращения: 04.07.2022).
9. О ведомственной охране : Федер. закон от 14 апр. 1999 № 77-ФЗ : принят Гос. Думой 17 март. 1999 г. : одобрен Советом Федерации 31 март. 1999 г. // Собрание законодательства Российской Федерации. 1999. № 16. Ст. 1935.
10. О специальных средствах, электрошоковых устройствах и искровых разрядниках, видах, типах и моделях служебного огнестрельного оружия, патронов к нему и нормах обеспечения ими работников подразделений транспортной безопасности и об утверждении Правил приобретения, хранения, ношения, учета, ремонта и уничтожения специальных средств, электрошоковых устройств и искровых разрядников, используемых работниками подразделений транспортной безопасности : постановление Правительства РФ от 15.11.2014 № 1209 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2014. № 47. Ст. 6566.
11. О специальных средствах и огнестрельном оружии, используемых ведомственной охраной : постановление Правительства РФ от 30.12.1999 №1436 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2000. № 2. Ст. 221.
12. Об утверждении Требований к знаниям, умениям, навыкам сил обеспечения транспортной безопасности, личностным (психофизиологическим) качествам, уровню физической подготовки отдельных категорий сил обеспечения транспортной безопасности, включая особенности проверки соответствия знаний, умений, навыков сил обеспечения транспортной безопасности, личностных (психофизиологических) качеств, уровня физической подготовки отдельных категорий сил обеспечения транспортной безопасности применительно к отдельным видам транспорта : приказ Министерства транспорта РФ от 21 августа 2014 г. № 231. // Российской газета. 2014. № 241. 22 окт.
13. Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищенности объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для различных категорий объектов транспортной инфраструктуры железнодорожного транспорта : постановление Правительства РФ от 08.10.2020 № 1633 // Кодекс : интернет-портал правовой информации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/566009033> (дата обращения 14.06.2022).
14. Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищенности объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для объектов транспортной инфраструктуры железнодорожного транспорта, не подлежащих категорированию : постановление Правительства РФ от 08.10.2020 № 1635 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2020. № 42. Ст. 6601 (Часть III).
15. Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, учитывающих уровни безопасности для транспортных средств железнодорожного транспорта : постановление Правительства РФ от 10.10.2020 № 1653 // Кодекс : интернет-портал правовой информации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565995405> (дата обращения 14.06.2022).
16. Об утверждении требований по соблюдению транспортной безопасности для физических лиц, следующих либо находящихся на объектах транспортной инфраструктуры или транспортных средствах, по видам транспорта, а также в зонах безопасности, установленных вокруг отдельных судов и (или) иных плавучих средств с ядерным реактором либо судов и (или) иных плавучих средств, транспортирующих ядерные материалы, объектов транспортной инфраструктуры : постановление Правительства РФ от 15.11.2014 № 1208 // Собрание законодательства Российской Федерации. 20104. № 47. Ст. 6565.

17. Об утверждении Правил проведения досмотра, дополнительного досмотра, повторного досмотра в целях обеспечения транспортной безопасности : приказ Министерства транспорта РФ от 23.07.2015 № 227 // Кодекс : интернет-портал правовой информации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420314779?section=text> (дата обращения 14.06.2022).

18. Психология труда : учебник и практикум для вузов / А. В. Карпов, Т.В. Башаева, Е.В. Конева и др. М. : Юрайт, 2022. 364 с.

References

1. Vlasov V.A., Travkin V.V., Grishin O.P. Analiz nekotorykh pravovykh kollizii transportnoi bezopasnosti [Analysis of some legal collisions of transport security]. *Pravo i gosudarstvo: teoriya i praktika* [Law and state: theory and practice], 2020, no. 11, pp. 224–228.

2. Gorshkov A.A. Konflikty v sotsial'no-kul'turnykh sistemakh kak istochnik razvitiya i instrument upravleniya [Conflicts in socio-cultural systems as a source of development and a management tool]. *Peterburgskii ekonomicheskii zhurnal* [Saint Petersburg Economic Journal], 2015, no. 2, pp.19–24.

3. Iroshnikov D.V. Teoreticheskie problemy legal'nogo opredeleniya transportnoi bezopasnosti i smezhnykh s nei kategorii [Theoretical problems of legal definition of transport security and related categories]. *Voprosy bezopasnosti* [Security issues], 2020, no. 1, pp. 17–29.

4. Shabanov S., Aleshina A. Nichego lishnego – tol'ko biznes. Emotsional'nyi intellekt dlya dostizheniya uspekha [Nothing superfluous – just business. Emotional intelligence for success]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2012. 336 p.

5. Volkova V.N., Lankin V.E. Primenenie printsipov teorii avtomaticheskogo upravleniya v sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh [Application of the principles of the theory of automatic control in socio-economic systems]. *π-Economy*, 2009, no. 5 (85), 2009, pp. 17–20.

6. Selezneva E.V. Psikhologiya upravleniya [Psychology of management]. Moscow: Yurait Publ., 2022. 373 p.

7. Federal'nyi zakon «O transportnoi bezopasnosti» ot 09.02.2007 No. 16-FZ. [Federal Law «On Transport Security» dated February 9, 2007 No. 16-FL].

8. Reestr akkreditovannykh v kachestve podrazdelenii transportnoi bezopasnosti yuridicheskikh lits (Elektronnyi resurs) [Register of Legal Entities accredited as Transport Security Units (Electronic resource)]. Available at: <https://rlw.gov.ru/opendata/7708525167-akkredpodrazd> (Accessed July 4, 2022)

9. Federal'nyi zakon «O vedomstvennoi okhrane» ot 14.04.1999 No. 77-FZ. [Federal Law «On Departmental Protection» dated April 14, 1999 No. 77-FL].

10. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 15.11.2014 No. 1209 «O spetsial'nykh sredstvakh, elektroshokovykh ustroystvakh i iskrovnykh razryadnikakh, vidakh, tipakh i modelyakh sluzhebnoy ognestrel'nogo oruzhiya, patronov k nemu i normakh obespecheniya imi rabotnikov podrazdelenii transportnoi bezopasnosti i ob utverzhdenii Pravil priobreteniya, khraneniya, nosheniya, ucheta, remonta i unichtozheniya spetsial'nykh sredstv, elektroshokovykh ustroystv i iskrovnykh razryadnikov, ispol'zuyemykh rabotnikami podrazdelenii transportnoi bezopasnosti» [Decree of the Government of the Russian Federation dated November 15, 2014 No. 1209 «On special means, electric shock devices and spark arresters, types, types and models of service firearms, cartridges for them and the standards for ensuring the work of transport security units and on approval of the Rules for the acquisition, storage, carrying, accounting, repair and destruction of special means, electric shock devices and spark arresters used by employees of transport security units»].

11. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 30.12.1999 No. 1436 «O spetsial'nykh sredstvakh i ognestrel'nom oruzhii, ispol'zuyemykh vedomstvennoi okhranoi» [Decree of the Government of the Russian Federation dated December 30, 1999 No. 1436 «On special means and firearms used by departmental security»].

12. Prikaz Ministerstva transporta RF ot 21.08.2014 g. No. 231 «Ob utverzhdenii Trebovaniy k znaniyam, umeniyam, navykam sil obespecheniya transportnoi bezopasnosti, lichnostnym (psikhofiziologicheskim) kachestvam, urovnyu fizicheskoi podgotovki otdel'nykh kategorii sil obespecheniya transportnoi bezopasnosti, vklyuchaya osobennosti proverki sootvetstviya znaniy, umeniy, navykov sil obespecheniya transportnoi bezopasnosti, lichnostnykh (psikhofiziologicheskikh) kachestv, urovnya fizicheskoi podgotovki otdel'nykh kategorii sil obespecheniya transportnoi bezopasnosti primenitel'no k otdel'nym vidam transporta» [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 231 dated August 21, 2014 «On Approval of Requirements for Knowledge, skills, Skills of Transport Security Forces, Personal (Psychophysiological) qualities, level of physical fitness of Certain categories of transport security forces, including features of verification of compliance of knowledge, skills, skills of transport security forces, personal (psychophysiological) qualities, the level of physical fitness of certain categories of transport security forces in relation to certain types of transport»].

13. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 08.10.2020 No. 1633 «Ob utverzhdenii trebovaniy po obespecheniyu transportnoi bezopasnosti, v tom chisle trebovaniy k antiterroristicheskoi zashchishchennosti ob'yektov (territorii), uchityvayushchikh urovni bezopasnosti dlya razlichnykh kategorii ob'yektov transportnoi infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta» [Decree of the Government of the Russian Federation dated October 8, 2020 No. 1633 «On approval of requirements for ensuring transport security, including requirements for anti-terrorist protection of objects (territories), taking into account security levels for various categories of railway transport infrastructure objects»].

14. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 08.10.2020 No. 1635 «Ob utverzhdenii trebovaniy po obespecheniyu transportnoi bezopasnosti, v tom chisle trebovaniy k antiterroristicheskoi zashchishchennosti ob'yektov (territorii), uchityvayushchikh urovni bezopasnosti dlya ob'yektov transportnoi infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta, ne podlezhashchikh kategorirovaniyu» [Decree of the Government of the Russian Federation dated October 8, 2020 No. 1635 «On approval of requirements for ensuring transport security, including requirements for anti-terrorist protection of objects (territories) that take into account security levels for railway transport Infrastructure facilities that are not subject to categorization»].

15. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 10.10.2020 No. 1653 «Ob utverzhdenii trebovaniy po obespecheniyu transportnoi bezopasnosti, uchityvayushchikh urovni bezopasnosti dlya transportnykh sredstv zheleznodorozhnogo transporta» [Decree of the Government of the Russian Federation dated October 10, 2020 No. 1653 «On approval of requirements for ensuring transport security safety, taking into account the safety levels for railway transport vehicles»].

16. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 15.11.2014 No. 1208 «Ob utverzhdenii trebovaniy po soblyudeniyu transportnoi bezopasnosti dlya fizicheskikh lits, sleduyushchikh libo nakhodyashchikhsya na ob'yektakh transportnoi infrastruktury ili transportnykh sredstvakh, po vidam transporta, a takzhe v zonakh bezopasnosti, ustanovlennykh vokrug otidel'nykh sudov i (ili) inykh plavuchikh sredstv s yadernym reaktorom libo sudov i (ili) inykh plavuchikh sredstv, transportiruyushchikh yadernye materialy, ob'yektov transportnoi infrastruktury» [Decree of the Government of the Russian Federation No. 1208 dated November 15, 2014 «On Approval of Requirements for Compliance with Transport Safety for Individuals Following or Located at Transport Infrastructure Facilities or Vehicles, by Type of Transport, as Well as in Safety Zones Established around Individual Vessels and (or) Other Floating Facilities with a Nuclear Reactor or ships and (or) other floating vehicles transporting nuclear materials, transport infrastructure facilities»].

17. Prikaz Ministerstva transporta RF ot 23.07.2015 No. 227 «Ob utverzhdenii Pravil provedeniya dosmotra, dopolnitel'nogo dosmotra, povtornogo dosmotra v tselyakh obespecheniya transportnoi bezopasnosti» [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 227 dated July 23, 2015 «On approval of the Rules for conducting inspection, additional inspection, re-examination in order to ensure transport security»].

18. Karpov A.V., Bashaeva T.V., Koneva E.V., Markova E.V., Myshkin I.Yu., Orel V.E., Razumovskaya O.L., Skityaeva I.M., Subbotina L.Yu., Cheremoshkina L.V. *Psikhologiya truda* [Psychology of labor]. Moscow: Yuriy Publ., 2022. 364 p.

Информация об авторах

Лившиц Александр Валерьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: livnet@list.ru.

Буторин Денис Витальевич, кандидат технических наук, начальник управления научно-исследовательских работ, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: den_butorin@mail.ru.

Филиппенко Николай Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизация производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: ifpi@mail.ru.

Горобец Андрей Николаевич, старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: vorobei6@mail.ru.

Александров Андрей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: alexandrov_aa@irgups.ru.

Information about the authors

Alexander V. Livshits, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: livnet@list.ru.

Denis V. Butorin, Ph.D. in Engineering Science, Head of the Department of Scientific Research, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: den_butorin@mail.ru.

Nikolai G. Filippenko, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: ifpi@mail.ru.

Andrei N. Gorobets, Assistant Professor of the Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: vorobei6@mail.ru.

Andrei A. Alexandrov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: alexandrov_aa@irgups.ru



ЛИВШИЦ АЛЕКСАНДР ВАЛЕРЬЕВИЧ

Доктор технических наук, профессор

Александр Валерьевич Лившиц родился в 1966 г. После окончания школы в 1983 г. поступил в Иркутский политехнический институт, который с отличием окончил в 1988 году по специальности «Автоматизация и комплексная механизация машиностроения». Остался работать в вузе сначала на должности инженера-электроника, затем - ассистента кафедры «Автоматизация машиностроения».

С 1994 по 2008 гг. Александр Валерьевич проходил службу в органах внутренних дел, занимая должности: старшего инженера программиста информационного центра Управления внутренних дел Иркутской области; старшего преподавателя; доцента; начальника научного отдела Восточно-Сибирского института МВД России. Ушел в отставку в звании подполковника внутренней службы.

Александр Валерьевич начал заниматься научной работой со студенческих лет и проявляет творческую активность в настоящее время. Его работа в течение многих лет связана с образовательной и научной деятельностью, совершенствованию машиностроительных технологических процессов, автоматизированных систем, внедрению современных информационных технологий.

В 1999 г. еще во время обучения в аспирантуре Иркутского государственного технического университета защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – «Технология машиностроения» на тему «Прогнозирование локальных остаточных деформаций при проектировании технологического процесса изготовления мало жестких деталей», связанную с авиационным машиностроением. В 2003 году Александру Валерьевичу присвоено звание доцента по кафедре конструирования машиностроения.

В 2016 году защитил докторскую диссертацию по специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)» на тему «Автоматизированное управление технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров».

Сегодня можно говорить об активно развивающейся научной школе высокочастотной электротермии полимеров и композитов, объединяющей ученых различных возрастов, аспирантов, магистрантов, студентов, сооснователем которой является Александр Валерьевич.

В 2018 – 2022 гг. будучи проректором по научной работе А.В. Лившиц занимался развитием системы научной периодики ИрГУПС, развитием молодежной научно-публикационной активности. Необходимо отметить работу научного журнала «Молодая наука Сибири», давшего многим молодым исследователям первый опыт научных публикаций. Александр Валерьевич является членом редакционных коллегий ряда научных журналов, в т.ч. «Известия Транссиба», «Computational Nanotechnology», «Сибирский аэрокосмический журнал».

С 2008 по 2018 г. и в настоящее время А.В. Лившиц работает в должности заведующего кафедрой «Автоматизация производственных процессов» Иркутского университета путей сообщения. Создал на базе Университета путей сообщения Учебно-производственный центр «Новые технологии», занимающийся обучением различным рабочим профессиям, и Учебный центр подготовки специалистов в области транспортной безопасности.

Александр Валерьевич является председателем диссертационного совета по специальностям 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», членом диссертационного совета Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева по специальности 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования (авиационная, ракетно-космическая и вычислительная техника) (по техническим наукам)» (г. Красноярск).

За плодотворную научно-педагогическую деятельность, многолетние исследования в области технологий авиационного машиностроения Александр Валерьевич награжден министерством внутренних дел РФ нагрудными знаками «200 лет МВД России», «За верность долгу», медали «За отличие в службе III степени», «90 лет милиции России», отмечен медалями «50 лет космонавтике» и «За верность авиации». Кроме того, А.В. Лившиц имеет большое количество региональных и вузовских Почетных дипломов и Благодарностей.

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№ 4 (76)
2 0 2 2

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **А.П. Хоменко**
Ответственный за выпуск **Д.В. Буторин**

Подписано в печать 29.12.2022. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 30.12.2022

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 29,18.

Уч.-изд. л. 21,21. Тираж 500 экз. Заказ № 3654

Подписной индекс по каталогу «Урал-Пресс»: 64556

ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН.

Сведения о журнале ежегодно

публикуются в международной справочной системе

по периодическим и продолжающимся изданиям

«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01

Маркировка информационной продукции - не маркируется

Цена свободная

Адрес редакции, издательства и типографии

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения

Телефон: 8(3952) 63-83-57, 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)