

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

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



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

Подписной индекс
в каталоге «Роспечать» – 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

2021 № 3(71)
No. 3(71)

Современные технологии.
Системный анализ. Моделирование

ISSN 1813-9108 (Print)

Современные технологии системный анализ Моделирование

2021
№ 3 (71)

Иркутский государственный
университет путей сообщения

Машиностроение • Машиноведение • Энергетические системы • Транспорт

Д.Т.Н., доцент

ЛЕВ БЕРКОВИЧ



«Оценка конструкционной прочности деталей машин различного назначения позволяет существенно сократить цикл их проектирования и испытания на прочность».

ЦВИК

Machine Building • Theoretical Engineering • Energy Systems • Transport

Modern technologies system analysis Modeling

2021
No. 3 (71)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№ 3 (71)
2 0 2 1

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **А.П. Хоменко**
Ответственный за выпуск **В.Е. Гозбенко**

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

В.Е. Гозбенко, д.т.н., проф., 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) 638-389; **Факс:** +7(3952) 38-77-46

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

e-mail: stsam@ircgups.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 науки и высшего образования РФ по специальностям: машиностроение и машиноведение; транспорт.

Modern technologies System analysis Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)

2021
No. 3 (71)

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

V.E. Gozbenko, D.Sc. in Engineering, Prof., 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) 638-389; **Fax:** +7(3952) 38-77-46

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 ПИИ № ФС77-66109 от June 20, 2016

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

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

The journal is included in the list of leading scholarly journals and editions in which the main results of dissertations for the scientific degree of a doctor and candidate of sciences, approved by the expert councils of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, should be published:

- Mechanical engineering and mechanical science;
- Transport.

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение, машиноведение и энергетические системы

Афанаськов П. М., Дединкин А. П. Моделирование течения воздушных потоков в генераторе контейнерного типа	10
Филиппенко Н. Г., Чумбадзе Т. Т., Беломестных А. А., Пискажова Т. В. Управление технологически процессами фотополимеризации	19
Белоголов Ю. И. Инженерная методика расчета рациональных геометрических размеров уплотнительного соединения с тонкостенными элементами	25
Попов А. С., Попов М. С., Попов С. И. Моделирование процесса отслоения краски и окисных загрязнений от металлических поверхностей при диэлектрическом нагреве с использованием конечно-элементной системы «Magc»	34

Транспорт

Пинчуков П. С., Макашева С. И. Анализ влияния обратного тягового тока на работу рельсовых цепей	40
Каминский А. В., Коваленко С. В., Гуляев А. В., Шухарев С. А. Моделирование векторного управления асинхронным двигателем во вращающейся системе координат	50
Рогалёв А. В., Емельянов А. Г., Андалиев С. Н. Разработка мероприятий по устранению ложного срабатывания телесигнализации системы телемеханики аппаратуры микропроцессорной телемеханики в границах Читинской дистанции электроснабжения Забайкальской железной дороги – филиала ОАО «РЖД»	59
Емельянов Д. О., Мартыненко Л. В. Анализ развития дефектов на поверхности катания грузовых вагонов в пути следования от места погрузки до места выгрузки	67
Бурдяк П. С. Управление рисками в организации движения поездов	76
Крюков А. В., Черепанов А. В., Степанов А. Д., Середкин Д. А., Фесак И. А. Цифровые модели перспективных систем тягового электроснабжения повышенного напряжения	83
Давыдов Ю. А., Мухин О. О., Заболотный В. В. Совершенствование системы поддержки жизненного цикла локомотивов	92
Романенко В. В., Невзорова А. Б., Ародь Л. Н. Графоаналитическое решение по оптимизации организации выправочно-рихтовочных работ по приведению кривых к проектной документации	102
Асламова В. С., Старовойтова Ю. Б., Асламов А. А., Асламова Е. А. Регрессионные модели для автоматизированного расчета показателей травматизма на железнодорожных переездах России и Иркутской области	111
Крипак М. Н., Лебедева О. А., Полтавская Ю. О. Совершенствование методов Организации перевозок и управления в бизнесе такси	121
Мартусов А. Л. Исследование работы регуляторов мощности испытательной станции тяговых электродвигателей подвижного состава	128

Краковский Ю. М., Начигин В. А., Кашковский В. В. Предложения по организации ремонтных работ верхнего строения пути в условиях увеличения объемов перевозки грузов	135
Рагимов Э. А. Сравнительный анализ энергоемкости и производства парниковых газов автомобильным и железнодорожным транспортом	142
Оленцевич В.А., Оленцевич А.А., Гозбенко В.Е. Оптимизация работы железнодорожных станций в условиях внедрения современных систем интервального регулирования движения поездов на восточном полигоне	149
Рожкова Е. А., Ковригина И. В. Разработка технологической оснастки для смены элементов рессорного комплекта тележек грузовых вагонов	158
Парахненко И. Л. Управление трением на дорожке катания как способ снижения силового взаимодействия в контакте «колесо – рельс»	165
Маловецкая Е. В. Применение принципов системного моделирования для построения прогнозных моделей вагонопотоков	171
Худоногов А. М., Иванов В. Н. Резервы повышения надежности коллекторных тяговых электродвигателей электровозов	179
Кузьмин О. В., Лавлинский М. В. Создание модели беспилотного летательного аппарата типа биплан, использующей генетический алгоритм в полете, для помощи в решении проблемы пожаров в Иркутской области	185
Мартыненко Л. В. Безопасность и эксплуатация железнодорожного транспорта при выполнении комплексных работ по неразрушающему контролю подшипников буксовых узлов	193

Информационные технологии, управление и обработка

Данеев А. В., Данеев Р. А., Рыжов И. А. Об опыте разработки мобильного приложения вопросов и ответов	202
---	-----

Персоналии

Д.т.н., доцент Л. Б. Цвик	212
---------------------------------	-----

CONTENTS

Machine Building, Theoretical Engineering and Energy Systems

Afanaskov P. M., Dedinkin A. P. Air flows Modeling for a container type generator	10
Filippenko N. G., Chumbadze T. T., Belomestnykh A. A., Piskazhova T. V. Management of technological of photopolymerization.....	19
Belogolov Yu. I. Engineering technique for calculating rational geometric dimensions of a sealing joint with thin-walled elements	25
Popov A. S., Popov M. S., Popov S. I. Modeling the process of paint peeling off metal surfaces and oxide contamination under dielectric heating using the finite element system “Marc”	34

Transport

Pinchukov P. S., Makasheva S. I. Analysis of the reverse traction current influence on the track circuits operation	40
Kaminsky A. V., Kovalenko S. V., Gulyaev A. V., Shukharev S. A. Simulation of vector control of an asynchronous motor in a rotating system of coordinates	50
Rogalyov A. V., Emeljanov A. G., Andaliyev S. N. Mesures for eradication of signaling subsystem false triggering in the AMT telemechanics system within the range of Chita power supply distance of Zabaykalskaya railroad, the subdepartment of Russian Railways	59
Emelyanov D. O., Martynenko L. V. Analysis of the defect formation on the rolling surface of freight cars en route from loading to unloading site	67
Burdyak P. S. Risk management in train operation	76
Kryukov A. V., Cherepanov A. V., Stepanov A. D., Seredkin D. A., Fesak I. A. Digital models of advanced high-voltage traction power supply systems	83
Davydov Yu. A., Mukhin O. O., Zabolotnyy V. V. Improvement of the locomotive life cycle support system	92
Romanenko V. V., Nevzorova A. B., Arod L. N. Graph-analytical solution for optimizing the organization of straightening works to bring the curves up to the project parameters	102
Aslamova V. S., Starovoitova Yu. B., Aslamov A. A., Aslamova E. A. Regression models for automated calculation of injury indicators on railway crossings in Russia and Irkutsk region	111
Kripak M. N., Lebedeva O. A., Poltavskaya Yu. O. Improvement of transportation organization and management methods in taxi business	121
Martusov A. L. Power regulators operation research for test station of rolling stock traction electric motors	128

Krakovsky Y. M., Nachigin V. A. Kashkowsky V. V. Proposals for repair works organization of the railway tra upper structure to increase the volume of cargo transportation	135
Ragimov E. A. Comparative analysis of energy intensity and greenhouse gas production by road and rail transport	142
Olencevich V. A., Olentcevich A. A., Gozbenko V. E. Optimization of railway stations operation in the context of the introduction of modern systems of train traffic interval regulation at the eastern polygon	149
Rozhkova E. A., Kovrigina I. V. Development of technological equipment for changing components of freight car trolley sheet-spring set	158
Parakhnenko I. L. Friction control on the skate as a method of reducing force interaction in the «wheel – rail» contact	165
Malovetskaya E. V. Application of system modeling principles for the construction of forecast models of car traffic	171
Khudonogov A. M., Ivanov V. N. Reserves for improving the reliability of collector traction electric motors of electric locomotives	179
Kuzmin O. V., Lavlinsky M. V. Creation of a biplan type uav model using a genetic algorithm in flight to help in solving the problem of fires in the Irkutsk region	185
Martynenko L. V Safety and operation of railway transport when performing complex works on non-destructive testing of axle box bearings	193

Information technology, management and processing

Daneev A. V., Daneev R. A., Ryzhov I. A. On the experience in developing mobile application "questions and answers"	202
--	-----

Personalities

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor L. B. Tsvik	212
---	-----

Требования к статьям, принимаемым к публикации

Рукописи статей представляются в электронном и распечатанном виде.

Рекомендуемый объем статей 9-12 стр.

1. К статье прилагается:

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

2. Статья включает в себя:

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

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

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

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

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

При вставке формул использовать только Microsoft Equation 3 с параметрами:

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

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

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

Статьи, представляемые в журнал, проходят обязательное рецензирование.

Самоцитирование журнала в статьях **запрещено**.

Пример оформления статьи представлен на сайте журнала: <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-302. Гозбенко Валерий Ерофеевич.

Телефон: 8(3952) 638-284. Факс: 8(3952) 38-77-46. E-mail: stsam@irgups.ru

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МАШИНОВЕДЕНИЕ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

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

Моделирование течения воздушных потоков в генераторе контейнерного типа

П. М. Афанаськов✉, А. П. Дединкин

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

✉ pavel.afanaskou@gmail.com

Резюме

В статье рассмотрено предназначение генераторов контейнерного типа и варианты их применения. Описаны основные технические характеристики, стандартное оснащение и компоновка генератора контейнерного типа (энергоконтейнера). Проведен анализ случаев аварийных остановок одной из установленных в рассматриваемом энергоконтейнере дизель-генераторных установок. Определено количество тепла, которое должно быть отведено в окружающую среду в рассматриваемом контуре охлаждения, для рассматриваемой модели генератора контейнерного типа. Представлено теоретическое обоснование причин, вызывающих аварийную остановку одного из дизель-генераторов, у рассматриваемой модели энергоконтейнера. Выполнен тепловизионный контроль для определения температур внешней и внутренней оболочек генератора контейнерного типа, а также элементов оборудования и дизель-генераторной установки при ее работе под нагрузкой. Описаны теоретические основы, положенные в работу модуля Solidworks Flow Simulation, который предназначен для решения прикладных задач гидрогазодинамики и сопряженного с ними теплообмена. Рассмотрены подходы «толстого пограничного слоя» и «тонкого пограничного слоя» используемые при моделировании пограничного слоя методом «двухмасштабных пристеночных функций» (метод конечных объемов). Выполнено компьютерное моделирование распределения воздушных потоков в объеме энергоконтейнера. Представлены основные результаты исследований, полученных в процессе моделирования распределения воздушных потоков в генераторе контейнерного типа. Проведен анализ результатов исследования и выработаны рекомендации по изменению конструкции рассмотренного энергоконтейнера с целью снижения температуры воздуха, поступающего на радиаторы охлаждения дизель-генераторов.

Ключевые слова

генераторы контейнерного типа, энергоконтейнер, малая энергетика, CFD-моделирование, температура воздушных потоков, дизель-генератор, система охлаждения, Flow Simulation

Для цитирования

Афанаськов П. М. Моделирование течения воздушных потоков в генераторе контейнерного типа / П. М. Афанаськов, А. П. Дединкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 10–18. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).10-18

Информация о статье

поступила в редакцию: 16.09.2021, поступила после рецензирования: 03.10.2021, принята к публикации: 17.10.2021

Air flows Modeling for a container type generator

P. M. Afanaskov✉, A. P. Dedinkin

Belarusian State University of Transport, Gomel, the Republic of Belarus

✉ pavel.afanaskou@gmail.com

Abstract

The purpose of the container-type generators and the options for their application are considered. The main technical characteristics, standard equipment and layout of the container-type generator (energy container) are described. The analysis of cases of emergency shutdowns of one of the diesel generator sets installed in the considered energy container is carried out. The amount of heat to be removed to the environment in the calculated cooling circuit for the considered container-type generator model has been determined. The theoretical substantiation of the reasons for the emergency shutdown of one of the diesel generators in the considered model of the energy container is presented. Thermal imaging control was carried out to determine the temperatures of the outer and inner shells of the energy container, as well as elements of equipment and a diesel generator set when operating under load. The theoretical foundations of the Solidworks Flow Simulation module, which are designed to solve applied problems of fluid dynamics and associated heat transfer, are described. The approaches of "thick boundary layer" and "thin boundary layer" used in modeling the boundary layer by the method of "two-scale near-wall functions" (finite volume method) are considered. Computer simulation of air flow distribution in the volume of the energy container has been carried out. The main research results obtained in the process of modeling the distribution of air flows in a container-type generator are presented. The analysis of the research results was carried out and recommendations were made for changing the design of the considered energy container in order to reduce the temperature of the air entering the cooling radiators of diesel generators.

Keywords

container-type generators, energy container, small power engineering, CFD-modeling, air flow temperature, diesel generator, cooling system, Flow Simulation

For citation

Afanaskov P. M., Dedinkin A. P. Modelirovanie techeniya vozdushnykh potokov v generatore kontejnernogo tipa [Air flows Modeling for a container type generator]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 10–18. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).10-18

Article Info

Received: 16.09.2021, Revised: 03.10.2021, Accepted: 17.10.2021

Введение

Генераторы контейнерного типа (энергоконтейнеры) предназначены для энергоснабжения: крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров, крупных сооружений, спортивных объектов или баз отдыха на постоянной основе. Генераторы данного типа позволяют максимально использовать потенциал инструментов малой энергетики – в самом широком диапазоне внешних погодных и климатических условий. Конструкция энергоконтейнеров позволяет разместить вместе с генераторной установкой комплекс дополнительного оборудования, включая дополнительные топливные баки, системы подогрева топлива, масла и охлаждающей жидкости, автоматизированные системы долива масла, средства автоматического запуска, остановки и мониторинга, системы вентиляции, автоматические жалюзи (заслонки) и многое др. В зависимости от поставленной задачи по нагрузке и необходимой мощности, данные генераторы можно устанавливать параллельно для сум-

мирования выходной мощности, в качестве силового агрегата используются дизельные двигатели различных производителей. Благодаря специальному звукоизоляционному исполнению большинства контейнеров, данные генераторы обладают исключительно низким уровнем шума, благодаря чему могут устанавливаться вблизи жилых объектов. Для работы в условиях сверхнизких температур некоторые производители выпускают специальные утепленные модификации энергоконтейнеров. За долгие годы эксплуатации генераторов контейнерного типа на территории США, Китая и стран Европы они зарекомендовали себя как надежные источники электрической энергии [1, 2].

Рассматриваемый в статье специализированный энергоконтейнер (рис. 1) предназначен для автономного централизованного энергоснабжения крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров, установленных на железнодорожных вагонах-платформах при постановке их в состав грузового поезда, для сопровождения скоро-

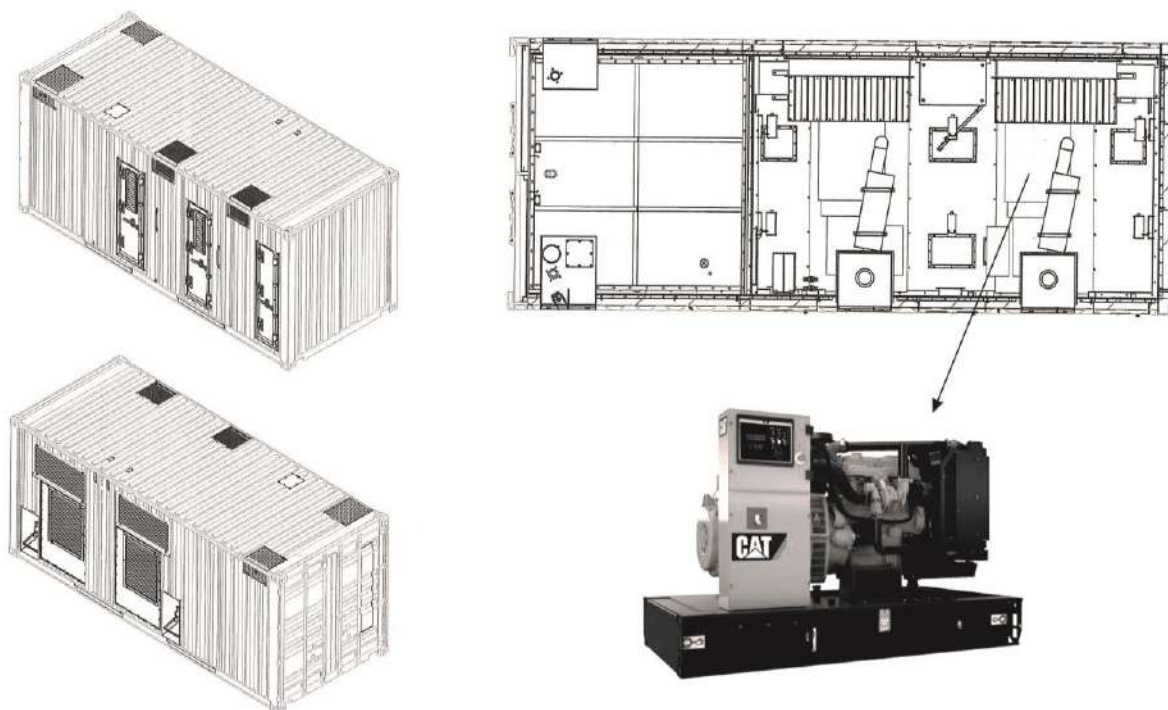


Рис. 1. Общий вид рассматриваемого энергоконтейнера и дизель-генераторной установки DE110E2

Fig. 1. General view of energy container and diesel generator set DE110E2

портящихся грузов [3, 4], так же допускается эксплуатация установленного в энергоконтейнере оборудования при стационарном размещении для промышленного назначения, рассмотренного выше. Энергоконтейнер выполнен на базе морского контейнера 1СС [5]. Время автономной работы данного энергоконтейнера, заявленное производителем, составляет 14 сут. с сохранением основных технических характеристик.

Система дистанционного мониторинга энергоконтейнера позволяет отслеживать: местоположение энергоконтейнера посредством навигации GPS / Глонасс; параметры работы дизель-генераторной установки; состояние системы пожаротушения; уровень топлива в дополнительном топливном баке; наличие (отсутствии) протечки топлива в дополнительном топливном баке; корректность функционирования дизель-генераторной установки; коммутацию силовых разъемов энергоконтейнера. Система удаленного управления, работа которой реализована через GSM-сети, позволяет осуществлять: отдельный запуск и остановку каждого дизель-генератора; коммутацию силовых разъемов питания между двумя дизель-генераторами; включение и выключение подогрева топливных фильтров. Контейнерное исполнение изделия необходимо для обеспечения защиты дизельных электростанций и инженерных систем от неблагоприятных воздействий окружающей среды, а также для комфортной работы обслуживающего персонала при проведении регламентных и ремонтных работ.

Рассматриваемый энергоконтейнер разрешается перевозить морским, речным, железнодорожным и автомобильным транспортом. Стандартное оснащение энергоконтейнера включает в себя:

- две дизель-генераторные установки;
- дополнительный топливный бак для хранения дизельного топлива;
- топливную систему для автоматического пополнения топливом расходных баков дизель-генераторной установки;
- электропит со встроенной системой удаленного управления работой электрооборудования и мониторинга работы систем энергоконтейнера;
- системы освещения, автоматического пожаротушения и вентиляции.

В энергоконтейнере установлены две дизель-генераторные установки DE110E2 на базе двигателя Caterpillar C4.4 (см. рис. 1).

Топливная система энергоконтейнера состоит из двух расходных баков емкостью 200 л каждый, входящих в комплектность дизель-генератора, а также дополнительного топливного бака, объемом 6 000 л, который имеет двойную оболочку для исключения протекания топлива.

Для охлаждения энергоконтейнера предусмотрена система вентиляции, которая включает четыре приточные воздушные заслонки и две воздушные заслонки для сброса отработанного воздуха

от радиаторной системы охлаждения дизель-генераторной установки. Открытие и закрытие вентиляционных заслонок происходит автоматически. Для обеспечения пожарной безопасности и мер предупреждения возникновения возгорания в энергоконтейнере размещается установка пожаротушения аэрозольного, газового или порошкового типа (по согласованию с заказчиком).

При нахождении контейнера в резерве, для непрерывного поддержания систем в рабочем состоянии, реализована возможность подключения к внешней сети 230 В посредством кабеля. При этом обеспечивается автоматическая подзарядка аккумуляторных батарей, подогрев систем дизель-генераторной установки и электрощита в зимний период.

В соответствии с заявленными характеристиками дизель-генераторная установка, размещенная в энергоконтейнере рассматриваемой модели, предназначена для работы в условиях температуры окружающего воздуха до +50°C, равно как и контейнер.

Во время эксплуатации энергоконтейнера на территории южных регионов Российской Федерации были отмечены случаи аварийных остановок правой дизель-генераторной установки, вызванные превышением предельной температуры охлаждающей жидкости. При этом в соответствии с системой мониторинга нагружаемая мощность не превышала 90 % от допустимой (60–65 кВт). Эксплуатирующей организацией было заявлено надлежащее состояние системы охлаждения, радиатора, вентилятора, уровня и качества охлаждающей жидкости и масла.

Изготовителем данного энергоконтейнера было принято решение доработать конструкцию контейнера совместно с Белорусским государственным университетом транспорта для исключения ситуаций самопроизвольной остановки дизель-генераторной установки во время эксплуатации.

Количество тепла, которое должно быть отведено в окружающую среду в рассматриваемом контуре охлаждения, определяется как [6, 7]

$$Q_k = \frac{q_o g_e N_e Q_n^p}{3600},$$

где q_o – доля тепла, отводимая через систему охлаждения; g_e – удельный часовой расход топлива, кг/кВт·ч; N_e – мощность двигателя, кВт; Q_n^p – удельная теплота сгорания топлива, кДж/кг, т. е.

$$Q_k = \frac{0,228 \cdot 211,5 \cdot 88,0 \cdot 42500}{3600} = 50,1 \text{ кВт}.$$

В результате представленного расчета полученное значение Q_k не превышает показатель, установленный производителем для данного типа двигателя 56,5 кВт [8]. Таким образом, перегрев с после-

дующим отключением дизель-генераторной установки может быть вызван местными зональными перегревами радиатора охлаждения. Воздух на радиатор охлаждения попадает, проходя через дизельное помещение и нагревается дополнительно относительно температуры воздуха, поступающего в энергоконтейнер из вне. Предельно допустимым уровнем в таком случае является температура 53°C, определенная заводом изготовителем дизель-генераторной установки [8, 9]. Однако при поступлении воздуха температурой 50°C в контейнер при существующей компоновке дизель-генераторной установки возможно предположить ситуации нагрева воздуха, проходящего через радиатор охлаждения, до температуры выше 53°C, что, соответственно, повлечет нагрев самого радиатора, приводящий к аварийным остановкам.

Таким образом, приемлемым в данном случае является вариант CFD-моделирования воздушных и температурных потоков в энергоконтейнере с последующим определением конечной температуры воздуха, поступающего на радиаторы охлаждения дизель-генераторных установок [10].

Тепловизионный контроль

Тепловизионный контроль выполнен с целью определения температур внешней и внутренней оболочек энергоконтейнера, а также элементов оборудования и дизель-генераторной установки при работе установки под нагрузкой [11, 12]. Дизель-генераторная установка контейнера нагружалась тепловыми пушками до режима номинальной нагрузки в рамках приемо-сдаточных испытаний. Температура окружающей среды +34 °С, солнечно.

Термографические изображения элементов энергоконтейнера, полученные с применением камеры тепловизионного контроля Testo 881-1, приведены на рис. 2.

В результате проведенных измерений установлено, что в целом при работе энергоконтейнера под нагрузкой температура воздушных масс внутри контейнера значительно возрастает относительно температуры окружающей среды. Во время измерений внутри помещения температура воздуха поднималась до 54–55 °С. Температура воздуха на жалюзи, через которые осуществляется приток воздуха, составляла 40–41 °С. Элементы ограждающих конструкций снаружи нагревались в диапазоне температур от 42°C (минимальная температура, теневая сторона) до 68 °С (максимальная температура, крыша), внутри контейнера – до 65 °С (максимальная температура, участок стены у дизель-генераторной установки). Наиболее нагретыми элементами внутри энергоконтейнера являются: термоизолированный глушитель с отводными патрубками (до 75 °С), блок дизеля (до 90 °С), выхлопной коллектор (до 300 °С), турбокомпрессор (до 350 °С). Температура решетки

радиатора градиентно изменялась в диапазоне от 48 до 61 °С.

Полученные значения температур использованы в качестве исходных данных при построении модели энергоконтейнера в CFD-среде [13].

Моделирование гидрогазодинамических процессов в энергоконтейнере

Компьютерное моделирование распределения воздушного потока в энергоконтейнере осуществлялось с помощью программного модуля Solidworks Flow Simulation, который предназначен для решения прикладных задач гидрогазодинамики и сопряженного с ними теплообмена [14].

Пакет прикладных программ Solidworks Flow Simulation решает осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса, замкнутые модифицированной k - ε моделью турбулентности с демпфирующими функциями, предложенными Лэмом и Бремхорстом, и ламинарно-турбулентным переходом, уравнения сохранения массы, момента и энергии. Для разрешения пограничного слоя используется метод «двухмасштабных пристеночных функций», который включает в себя пристеночную функцию с использованием «подсеток» в пограничном слое [15, 16]. Данный метод состоит в сочетании двух подходов, объединяющих решения в пограничном слое и внешнем потоке:

1. Подход «толстого пограничного слоя» используется при моделировании пограничного слоя плотной сеткой, где параметры ламинарного пограничного слоя находятся из уравнений Навье – Стокса, а турбулентный пограничный слой моделируется известными пристеночными функциями, основанными на демпфирующей функции Ван-Дриесты, позволяющей разрешать не только логарифмическую зону, как в классическом подходе, но и ламинарный подслой с буферной зоной.

2. Подход «тонкого пограничного слоя» используется при моделировании пограничного слоя разреженной сеткой, где уравнения Прандтля для пограничного слоя интегрируются вдоль нормали к стенке, от 0 (на поверхности) до динамической толщины пограничного слоя, и решаются вдоль линий тока газа на поверхности стенки.

3. В промежуточных случаях используется объединение двух представленных подходов, включающих гладкий переход между обеими моделями в местах уплотнения сетки или утолщения пограничного слоя на поверхности.

Основные уравнения решаются на основании метода конечных объемов: управляющие уравнения в частных производных (уравнения Навье – Стокса, уравнения сохранения массы и энергии и уравнения турбулентности [17]) реконструируются в консервативной форме и затем решаются по дискретным объемам управления. Эта дискретизация гарантиру-

ет сохранение потоков через определенный контрольный объем [15, 18]

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint Q dV + \iint F dA = 0,$$

где Q – вектор сохраняемых переменных; V – объем элемента управляющего объема; F – вектор потоков; A – площадь поверхности элемента управляющего объема.

Для получения пространственной дискрети-

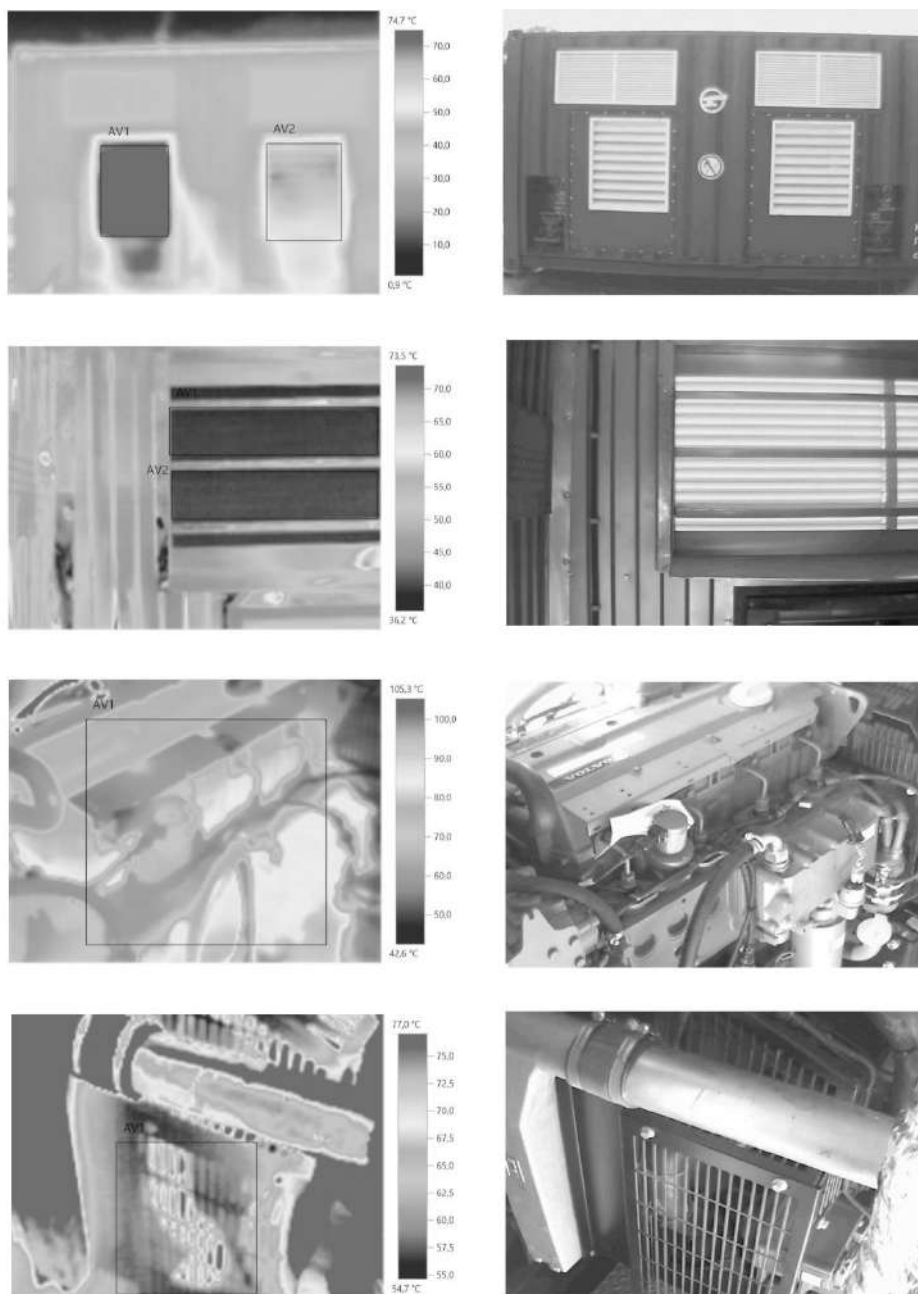


Рис. 2. Термографические изображения элементов энергоконтейнера:

а – боковая стена снаружи (области средних значений AV1 = 85,9 °С, AV2 = 60,5 °С); *б* – жалюзи приточной вентиляции в боковой стене (области средних значений AV1 = 40,1 °С, AV2 = 40,4 °С); *в* – дизель-генератор (область средних значений AV1 = 71,6 °С); *г* – вентилятор охлаждения радиатора (область средних значений AV1 = 62,1 °С)

Fig. 2. Thermographic images of energy container elements:

a – side wall from outside (mean values areas AV1 = 85,9 °С, AV2 = 60,5 °С); *b* – inflow ventilation shutters in the side wall (mean values areas AV1 = 40,1 °С; AV2 = 40,4 °С); *v* – diesel generator (mean value areas AV1 = 71,6 °С), *g* – radiator cooling fan (mean values areas AV1 = 62,1 °С)

зации вдали от тела используется декартовая прямоугольная сетка. Приграничные ячейки получаются из исходной прямоугольной сетки путем обрезания поверхностью тела пересекающихся с ней ячеек. Следовательно, приграничные – многогранники, с одной стороны являющиеся частью прямоугольной декартовой сетки, а с другой – повторяющие форму поверхности тела.

Данный подход имеет преимущества, основанные на регулярных сетках и разрешающих границы геометрии высокой точности. Пространственные производные аппроксимируются неявными разностными операторами второго порядка точности. Производные по времени округлены неявной схемой Эйлера первого порядка точности.

Для проведения исследования течения воздушных потоков были определены следующие начальные условия: в качестве текучей среды выбран воздух; температура окружающей среды – 50°C (определена как верхний температурный предел эксплуатации энергоконтейнера); давление окружающей среды установлено $101\,325\text{ Па}$. В качестве критериев сходимости расчета приняты: тепловой поток; конвективный тепловой поток; плотность теплового потока и температура в текучей среде.

Распределения воздушных потоков в энергоконтейнере стандартного исполнения

Разработанная 3D-модель с результатами моделирования представлена на рис. 3. Модель состо-

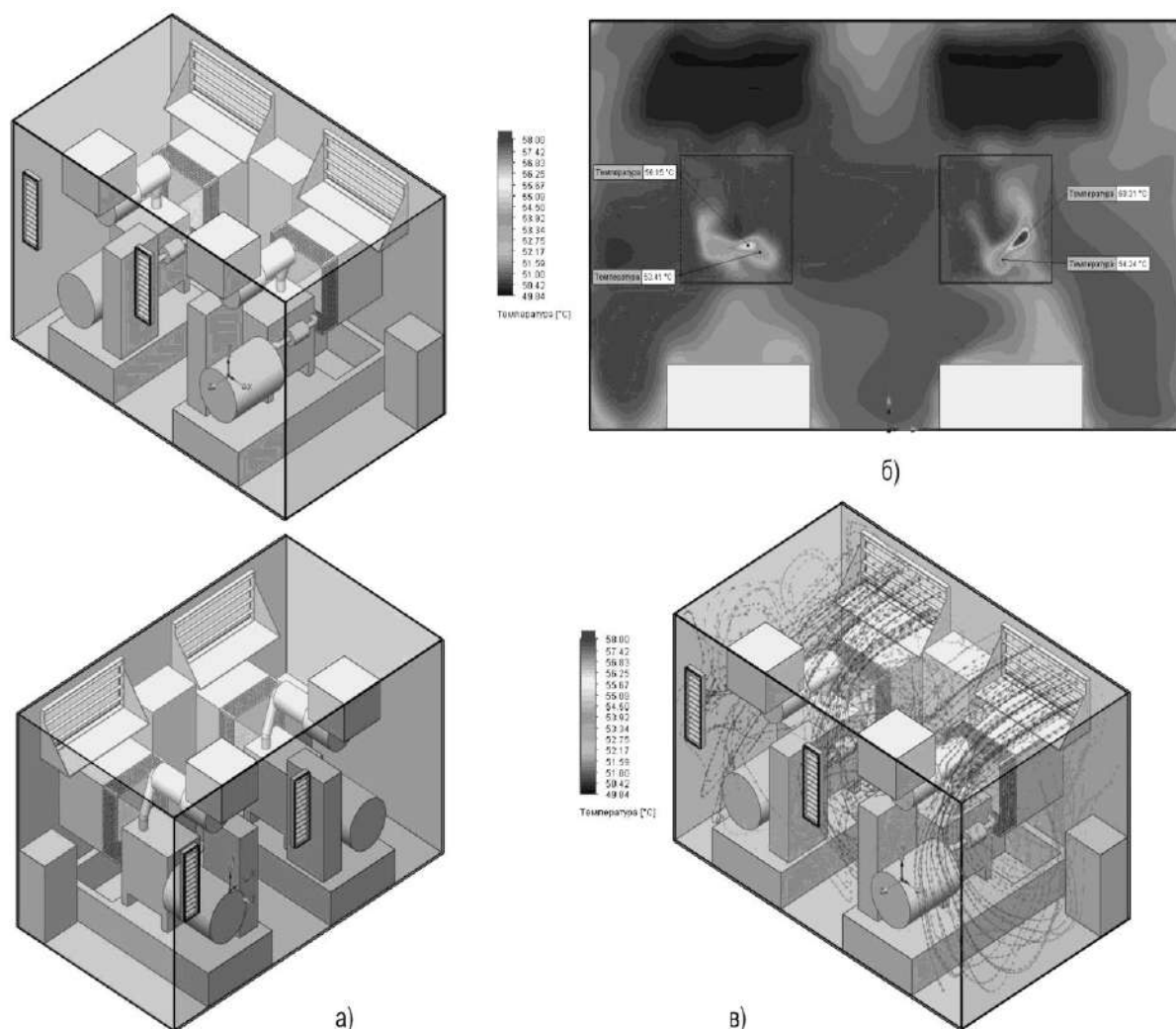


Рис. 3. 3D-модель стандартного исполнения энергоконтейнера:

- a* – конечно-элементная модель; *б* – распределение температуры воздушных потоков в секущей плоскости, проходящей через радиаторы системы охлаждения дизель-генераторов ($^{\circ}\text{C}$);
в – движение температурных потоков воздуха в объеме энергоконтейнера ($^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3. 3D model of standard energy container:

- a* – finite-element model; *b* – air flow temperature distribution in the cross-section going through radiators of diesel generator cooling system; *v* – thermal air flows motion within the volume of energy container

ит из 615 855 конечных элементов, 1 294 898 конечных объемов и 354 221 переходных элементов. Определены следующие граничные условия модели: объемный расход воздуха на выходе вентилятора системы охлаждения принят $187 \text{ м}^3/\text{мин}$ (из технических характеристик дизель-генераторной установки); в плоскостях заслонок дверей и верхних вентиляционных заслонок принято давление окружающей среды – $101\,325 \text{ Па}$.

Распределения воздушных потоков в энергоконтейнере с двумя дополнительными вертикально расположенными заслонками в торцевой стене и вентилятором нагнетания воздуха в нижней заслонке, а также вентилятором, обеспечивающим отток теплого воздуха

Разработанная 3D-модель представлена на рис. 4, а. Модель состоит из 633 242 конечных элементов, 1 288 023 конечных объемов и 363 971 переходных

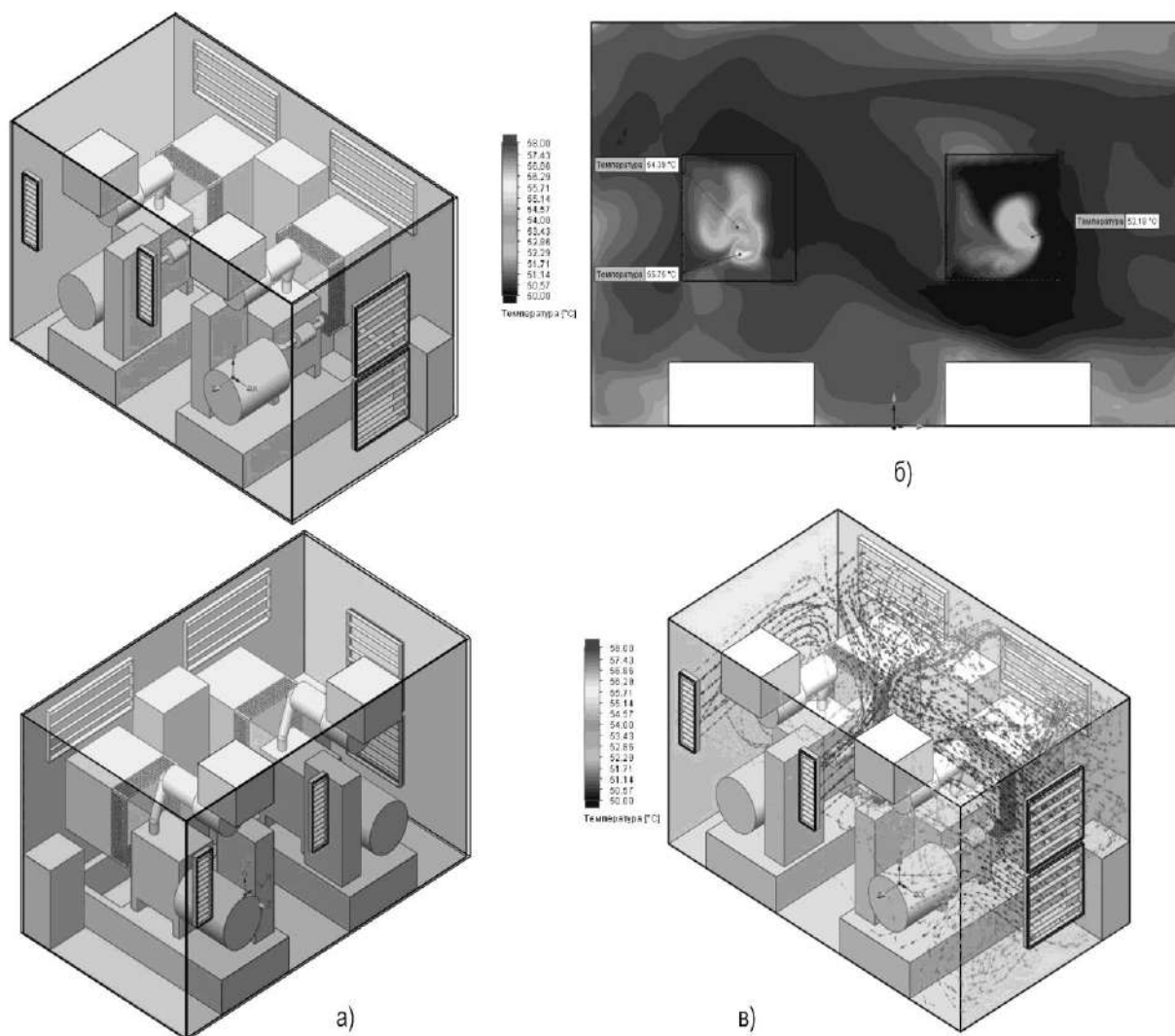


Рис. 4. 3D-модель стандартного исполнения энергоконтейнера с двумя дополнительными заслонками, вентилятором нагнетания воздуха и вентилятором, обеспечивающим отток теплого воздуха: а – конечно-элементная модель; б – распределение температуры воздушных потоков в секущей плоскости, проходящей через радиаторы системы охлаждения дизель-генераторов ($^{\circ}\text{C}$); в – движение температурных потоков воздуха в объеме энергоконтейнера ($^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4. 3D model of a standard energy container with 2 additional flaps, an inflow fan and a warm air outflow fan:

a – finite-element model; b – air flow temperature distribution in the cross-section going through radiators of diesel generator cooling system; v – thermal air flows motion within the volume of energy container ($^{\circ}\text{C}$)

элементов. Определены следующие граничные условия модели: объемный расход воздуха на выходе вентилятора системы охлаждения принят $187 \text{ м}^3/\text{мин}$; объемный расход воздуха на входе для вентилятора YWF-630(Z), нижней вертикально расположенной заслонки VKZ 700×700 , принят $200 \text{ м}^3/\text{мин}$; объемный расход воздуха на выходе верхней левой заслонки принят $100 \text{ м}^3/\text{мин}$; верхняя правая заслонка закрыта; в плоскостях заслонок дверей и верхней заслонки VKZ 700×700 (расположена в боковой стене) принято давление окружающей среды $101\,325 \text{ Па}$.

В результате проведенного расчета было получено распределение температуры воздушных потоков в секущей плоскости, проходящей через радиаторы системы охлаждения дизель-генераторов (рис. 4, б) и движение температурных потоков воздуха в объеме энергоконтейнера (рис. 4, в).

В результате проведенных исследований было рассмотрено более 30 различных вариантов расположения дополнительного оборудования для усовершенствования системы воздушного охлаждения энергоконтейнера. По результатам моделирования установлено, что большинство из рассмотренных вариантов вентиляции дизельного пространства энергоконтейнера позволяют несколько снизить температуру воздуха, поступающую на радиаторы охлаждения. Представим некоторые рассмотренные варианты для сравнения:

1. Стандартное исполнение представлено на рис. 3. Зональный нагрев части радиатора правой дизель-генераторной установки до $60,3^\circ\text{C}$, левой – до $56,1^\circ\text{C}$.

2. Распределение воздушных потоков в энергоконтейнере с двумя дополнительными горизонтально расположенными заслонками в торцевой стене и вентиляторами нагнетания воздуха в них показало, что зональный нагрев части радиатора правой дизель-генераторной установки достигает температуры $58,9^\circ\text{C}$, левой – $58,6^\circ\text{C}$.

3. Распределение воздушных потоков в энергоконтейнере с двумя дополнительными заслонками в боковой стене показал, что зональный распределенный нагрев радиатора правой дизель-генераторной установки приближается к значению температуры в

$56,3^\circ\text{C}$. На радиаторе охлаждения левой дизель-генераторной установки выявлен недопустимый зональный нагрев до температуры $60,7^\circ\text{C}$.

4. Исполнение энергоконтейнера представленное на рис. 4. Наблюдается незначительный распределенный нагрев части радиатора правой дизель-генераторной установки до $53,2^\circ\text{C}$, а также допустимый точечный нагрев левой – до $55,7^\circ\text{C}$.

Заключение

Установлено что рассмотренная модель энергоконтейнера в стандартном исполнении с двумя дизель-генераторными установками DE110E2 подвержен риску аварийной остановки правой (с лицевой стороны) дизель-генераторной установки при температуре воздуха окружающей среды свыше 44°C .

Работа в аварийном режиме дизель-генераторной установки вызвана местными зональными перегревами радиатора охлаждения правой дизель-генераторной установки, воздух на которую попадает, проходя дизельное помещение и нагревается дополнительно относительно температуры приточного воздуха (воздуха окружающей среды).

Оптимальным является установка вытяжных вентиляторов в верхнее левое вентиляционное отверстие для отвода из дизельного помещения теплого воздуха с одновременной вертикальной установкой двух дополнительных вентиляционных заслонок в торцевую стену (см. рис. 4, а). При этом достаточным будет установить нагнетающий вентилятор только в нижнюю вентиляционную заслонку торцевой стены, наиболее приемлемым является вариант расположения дополнительных заслонок вертикально одна над другой. Однако при такой компоновке достаточным является охлаждение правой дизель-генераторной установки, условия работы левой дизель-генераторной установки улучшаются не значительно, что теоретически также может привести к ее остановке.

Рассмотренные варианты размещения заслонок, нагнетающих воздух в дизельное пространство в боковой стене (между дверей), в пространстве пола не позволяют обеспечить требуемые условия охлаждения и снизить температуру на радиаторах до необходимых значений.

Список литературы

1. Пигарев В.Е. Холодильные машины и установки кондиционирования воздуха: учебник. М. : Маршрут, 2003. 424 с.
2. Мартинов И.Е. Холодильное оборудование вагонов. Харьков : УГАЖТ, 2013. 134 с.
3. Леонтьев А.П. Подготовка и перевозка скоропортящихся грузов. М. : Транспорт, 1991. 175 с.
4. Леонтьев А.П. Перевозка скоропортящихся грузов. М. : Транспорт, 1986. 304 с.
5. ГОСТ Р 53350-2009. Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и масса. М. : Стандартинформ, 2018. 28 с.
6. Сахаров П.А. Проектирование тепловоза. Гомель : БелГУТ, 2017. 79 с.
7. Понявкин Д.Ю. Тепловозы ТЭМ7 и ТЭМ7А: системы охлаждения дизель-генераторов типа Д49 // Локомотив. 2014. № 4 (688). С. 20–23.
8. Cat C4.4 ACERT. Engine Specification Manual. Publication TPD1752 Issue 7. 2012. 288 p.
9. Cooling Systems. Caterpillar : application & Installation Guide. LEBW4978-14. 2016. 128 p.
10. Попов А.Ю. Моделирование распределения воздушного потока в программном комплексе Solidworks Flow Simulation // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. № 3-3. С. 74–77.

11. Рубан В.Г., Воронин О.А. Комплексный подход к организации тепловой диагностики узлов локомотивов в условиях депо // Транспорт-2011 : тр. Всерос. науч.-практ. конф. Ч. 2. Ростов-на-Дону, 2011. С. 421–423.
12. Technology and evolution procedures of integrated diagnostic survey of large power transformers / V.V. Smekalov et al. // CIGRE : SC 33 Conference. Prague, 2000. P. 1–6.
13. Numerical simulation of slug flow mass transfer in the pipe with granular layer / D.P. Khrantsov et al. // 22nd international congress of chemical and process engineering. 2016. P. 1354–1355.
14. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский и др. М. : БХВ-Петербург, 2016. 800 с.
15. Вершков В.А. Инженерное программное обеспечение Dassault. Systems SolidWorks. Жуковский, 2018. 142 с.
16. A comparison study between an adaptive quadtree grid and uniform grid upscaling for reservoir simulation / M. Babaei et al. // Transp. Porous Media. 2013. P. 377–400.
17. CFD simulation of heat transfer and turbulent fluid flow over a double forward-facing step / H. Togun et al. // Mathematical problems in engineering. 2013. № 2013. P. 1–10.
18. Simulation and calculation of multi-flow, multistage systems of heat exchangers / V.P. Zhukov et al. // Fibre chemistry. 2019. № 4. P. 303–307.

References

1. Pigarev V.E. Kholodil'nyye mashiny i ustanovki konditsionirovaniya vozdukhа [Refrigerating machines and air conditioning units: textbook]. Moscow: Marshrut Publ., 2003. 424 p.
2. Martinov I.E. Kholodil'noye oborudovaniye vagonov [Refrigeration equipment for cars]. Kharkov: UGAGT Publ., 2013. 134 p.
3. Leontiev A.P. Podgotovka i perevozka skoroportyashchikhsya gruzov [Preparation and transportation of perishable goods]. Moscow: Transport Publ., 1991. 175 p.
4. Leontiev A.P. Perevozka skoroportyashchikhsya gruzov [Transportation of perishable goods]. Moscow: Transport Publ., 1986. 304 p.
5. GOST R 53350-2009. Kontejnery gruzovye serii 1. Klassifikatsiya, razmery i massa [State Standard 53350-2009. Freight containers series 1. Classification, dimensions and weight]. Moscow: Standartinform, 2018. 28 p.
6. Sakharov P.A. *Proyektirovaniye teplovoza* [Diesel locomotive design]. Gomel: BelGUT Publ., 2017. 79 p.
7. Ponyavkin D.Y. Teplovozy TEHM7 i TEHM7A: sistemy okhlazhdeniya dizel'-generatorov tipа D49 [Diesel locomotives TEM7 and TEM7A: cooling systems for diesel generators of type D49]. *Lokomotiv* [Lokomotiv]. 2014, no. 4 (688), pp. 20–23.
8. Cat C4.4 ACERT. Engine Specification Manual. Publication TPD1752, 2012. Issue 7. 288 p.
9. Application & Installation Guide. Cooling Systems. Caterpillar/LEBW4978-14. 2016. 128 p.
10. Popov A.Yu. Modelirovaniye raspredeleniya vozdushnogo potoka v programmnom komplekse Solidworks Flow Simulation [Modeling the air flow distribution in the Solidworks Flow Simulation software package]. *Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk* [Actual problems of the humanities and natural sciences], 2017, No 3-3, pp. 74–77.
11. Ruban V.G., Voronin O.A. Kompleksnyj podkhod k organizatsii teplovoj diagnostiki uzlov lokomotivov v usloviyakh depo [An integrated approach to the organization of thermal diagnostics of locomotive units in a depot]. *Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Transport-2011», chast' 2* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference "Transport-2011", part 2], 2011, pp. 421–423.
12. Smekalov V.V. and etc. Technology and evolution procedures of integrated diagnostic survey of large power transformers. CIGRE. SC 33 Conference. Prague, 2000, pp. 1–6.
13. Khrantsov D.P. and etc. Numerical simulation of slug flow mass transfer in the pipe with granular layer. *22nd international congress of chemical and process engineering*, 2016, pp. 1354–1355.
14. Alyamovskiy A.A. and etc. SolidWorks. Komp'yuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike [SolidWorks. Computer modeling in engineering practice]. Moscow: BHV-Petersburg Publishing, 2016. 800 p.
15. Vershkov V.A. Inzhenernoye programmnoye obespecheniye Dassault. Systems SolidWorks [Dassault engineering software. SolidWorks systems: a tutorial]. Zhukovsky, 2018. 142 p.
16. Babaei M. and etc. A comparison study between an adaptive quadtree grid and uniform grid upscaling for reservoir simulation. *Transp. Porous Media*, 2013, pp. 377–400.
17. Togun H. and etc. CFD simulation of heat transfer and turbulent fluid flow over a double forward-facing step. *Mathematical problems in engineering*. 2013, No. 2013, pp. 1–10.
18. Zhukov V.P. and etc. Simulation and calculation of multi-flow, multistage systems of heat exchangers. *Fibre chemistry*, 2019, No. 4, pp. 303–307.

Информация об авторах

Афанаськов Павел Михайлович – к. т. н., научный сотрудник ОНИЛ «ТТОРЕПС», Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, e-mail: pavel.afanaskou@gmail.com
Дединкин Андрей Петрович – к. т. н., старший преподаватель кафедры локомотивов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, e-mail: adedinkin@yandex.ru

Information about the authors

Pavel M. Afanaskov – M. Eng., Researcher ONIL “TTOREPS”, Belarusian State University of Transport, Gomel, e-mail: pavel.afanaskou@gmail.com
Andrey P. Dedinkin – M. Eng., lecturer of the Subdepartment of Locomotives, Belarusian State University of Transport, Gomel, e-mail: adedinkin@yandex.ru

Управление технологическими процессами фотополимеризации

Н. Г. Филиппенко¹✉, Т. Т. Чумбадзе¹, А. А. Беломестных¹, Т. В. Пискажова²

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

² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

✉ ifpi@mail.ru

Резюме

В данной статье исследуется понятие фотополимера, его ультрафиолетовое излучение зоны А и зоны С. Общий механизм полимеризации фотоотверждаемых композиций. Изучен фотополимер ROEHM R-50, его достоинства и недостатки. По недостаткам фотополимера ставится задача, направленная на разработку методики получения композиционно-конструкционных фотополимеров. На основе этого рассматривается терминологическая особенность понятия композиционных материалов (композит). На базе данного способа упрочнения изделий машиностроения, используемого на железной дороге, так называемого наклепа, его понятия, получения в процессе пластической деформации дается графическая иллюстрация наклепа в разрезе. Также показывается изменение им механических характеристик исходного материала. Рассматривается физика процесса формирования наклепного слоя на поверхности изделия. На основе анализа неклепного упрочнения предложена методика упрочнения изделий из фотополимера с использованием раstra (растровое упрочнение), что, в свою очередь, идентично процессу наклепа. Показан процесс изготовления изделий из фотополимера с растром (растровым упрочнением), дается описание процессов полимеризации фотополимера с растром (растровым упрочнением). Приводятся показатели твердости по результатам экспериментов фотополимера и фотополимера с растром (растровым упрочнением). Проведенный анализ данных позволил подтвердить предложенную методику по увеличению твердости за счет раstra (растрового упрочнения), способного устранить один из недостатков фотополимера. Для устранения других выявленных недостатков фотополимера в статье были поставлены задачи и определены направления изучения композиционного материала (композита) – полиакрилата, что является целью дальнейших исследований.

Ключевые слова

фотополимер, полимеризация, наклеп, растр, растровое упрочнение

Для цитирования

Филиппенко Н. Г. Управление технологическими процессами фотополимеризации / Н. Г. Филиппенко, Т. Т. Чумбадзе, А. А. Беломестных, Т. В. Пискажова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 19–24. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).19-24

Информация о статье

поступила в редакцию: 14.08.2021, поступила после рецензирования: 26.08.2021, принята к публикации: 29.08.2021

Management of technological processes of photopolymerization

N. G. Filippenko¹✉, T. T. Chumbadze¹, A. A. Belomestnykh¹, T. V. Piskazhova²

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉ ifpi@mail.ru

Abstract

In the article the concept of photopolymer is studied, as well as its UV radiation of zone A and zone C and the general mechanism of polymerization of photocurable compositions. Advantages and flaws of a Photopolymer ROEHM R-50 were studied. As to the photopolymer's flaws, the task was to develop a method for obtaining composite structural photopolymers. Based on this, the terminological specifics of the concept of composite materials (composite) are considered. One of the methods of product strengthening in mechanical engineering used on the railway, the so-called work hardening is considered as well as its concept and production in the process of plastic deformation and its graphic illustration is shown in cross section. Also, the change in the mechanical characteristics of the initial material is shown. Formation of a hardened layer on the surface of the product is also considered. The technique for photopolymer product hardening is proposed based on the analysis of the work hardening, using raster (raster hardening), which in turn is identical to the work hardening process. A process of manufacturing of photopolymer products with a raster (raster hardening) is shown with a description of the polymerization processes of a photopolymer with a raster (raster hardening). Hardness indicators are given based on the experiments with photopolymer and photopolymer with a raster (raster hardening). The data analysis given made it possible to confirm the proposed technique of hardening due to raster (raster hardening), capable of eliminating one of the photopolymer's flaws. To eliminate other identified flaws of the photopolymer, the tasks were set and directions determined for the study a composite material (composite) - polyacrylate which is to be the goal of further research.

Keywords

photopolymer, polymerization, work hardening, raster, raster hardening

For citation

Filippenko N.G., Chumbadze T.T., Belomestnykh A.A., Piskazhova T.V. Upravlenie tekhnologicheskimi protsessami fotopolimerizatsii [Management of technological processes of photopolymerization]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3(71), pp. 19–24. –DOI:10.26731/1813-9108.2021.3(71).19-24

Article Info

Received: 14.08.2021, Revised: 26.08.2021, Accepted: 29.08.2021

Введение

Фотополимеры – общее название группы полимеров и полимеризационно-способных соединений, отверждение которых осуществляется световым облучением. Они отверждаются светом, при этом не выделяя побочных веществ, не изменяясь визуально (только твердеют), проявляя завидные прочностные и стойкостные характеристики. К примеру, если прочность при сжатии стандартной эпоксидной пластмасы (одной из наиболее прочных и поэтому применяемых в промышленности и быту) – 140–160 МПа, то прочность фотополимерных композитов – 180–300 МПа, т. е. на 30–80 % выше (рис. 1).

Ультрафиолетовые (УФ) излучения зоны А (315–380 нм) примерно 360 нм и источник УФ-излучения зоны С (200–280 нм) – 256 нм. Финишнинг необходим для закрытия пор [1].

Для исследований нами был использован фотополимер ROEHM R-50, производство США (рис. 2).

имеет ряд преимуществ:

- быстрота затвердевания (минимальное время засветки 30 с, что ускоряет время работы);
- универсальность (пригодный для работы с любой моделью экспонирующей камеры);
- высокая текучесть и средняя вязкость;
- срок годности (значительно дольше, чем у других видов жидких полимеров, что актуально при оптовой закупке материала) [2, 3].



Рис. 2. Фотополимер ROEHM R-50

Fig. 2. Photopolymer ROEHM R-50

По сравнению с другими фотополимерами, он Так же нами были изучены технологии изготовления изделий из фотополимера, по которым мы сделали вывод, что полученные изделия имеют:

- низкую ударопрочность и износостойкость;
- недостаточную твердость;
- недостаточную пластичность материала.

Устранение указанных недостатков изделий из фотополимера, сдерживающих их широкое использование на транспорте, нам видится при решении задачи, направленной на разработку методики получения композиционно-конструкционных фото-

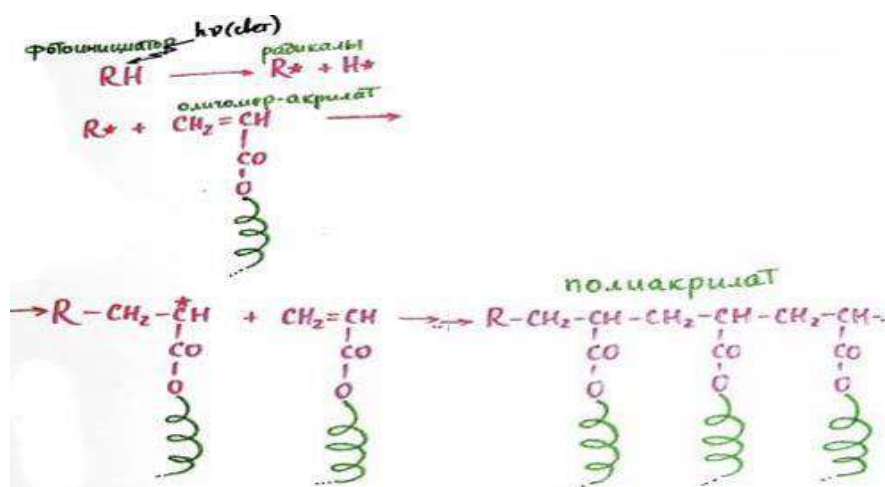


Рис. 1. Общий механизм полимеризации фотоотверждаемых композиций

Fig. 1. General mechanism of polymerisation of photocured compositions

полимеров.

Композитный материал (композит) – неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов, отличающихся как химическими, так и физическими свойствами, среди которых можно выделить армирующие элементы, обеспечивающие необходимые механические характеристики материала, и матрицу (или связующие), обеспечивающие совместимую работу армирующих элементов. В результате соединения этих материалов с уникальными свойствами получается композит с характеристиками, которыми каждый материал в отдельности обладать не может [4, 5].

Несмотря на достоинства, описанная технология не всегда позволяет получить материалы с локально или поверхностно измененными свойствами. В изделиях из металлов эту задачу решает термообработка, физико-химическая обработка, жеробейка (при литье). Также одним из способов упрочнения изделий является наклеп (рис. 3).

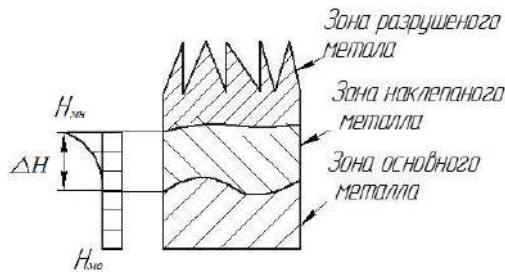


Рис. 3. Наклеп – вид в разрезе
Fig. 3. Work hardening, cross section view

Наклеп – это упрочнение металлов и сплавов вследствие изменения их структуры и фазного состава в процессе пластической деформации при температуре ниже температуры рекристаллизации [6–10]. Деформирование в процессе наклепа приводит к изменению как внутренней структуры, так и фазного состава металла. В результате таких изменений в кристаллической решетке возникают дефекты, которые выходят на поверхность деформируе-

мого изделия. Естественно эти процессы приводят и к изменению механических характеристик металла. В частности, с ними происходит следующее:

- повышение твердости и прочности;
- снижение пластичности и ударной вязкости, а также сопротивляемости к деформациям, имеющим противоположный знак;
- ухудшение устойчивости к коррозии.

Наклепанный слой на поверхности изделия может быть сформирован неумышленно, тогда такой процесс является вредным. Процесс считается полезным, если наклеп получили специально [6–8]. При наклепе незначительно меняются геометрические размеры изделия.

Для обработки полимеров данная технология не применима [11], поэтому нами впервые была предложена методика упрочнения изделий из фотополимера с использованием раstra (растровое упрочнение) [1], что по нашей гипотезе идентично процессу наклепа.

Растрирование или разложение изображения, представляет собой микровозвышение на материале не вызывающее изменений его номинального размера (рис. 4).

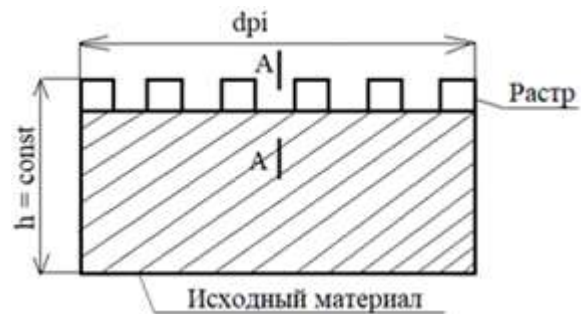


Рис. 4. Растр (растровое упрочнение)
Fig. 4. Raster (raster hardening)

Растр измеряется в dpi (dpi – количество точек на 1 дюйм). Как было сказано ранее, было выдвинуто предположение, что с помощью растриро-

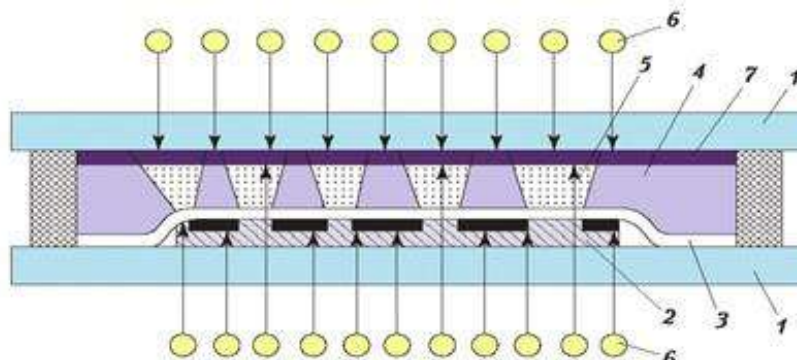


Рис. 5. Полимеризация фотополимера с растром (растровое упрочнение)
Fig. 5. Photopolymer polymerisation with raster (raster hardening)

вания происходит упрочнение, увеличивается твердость изделия. Количество и форма точек растрового изображения планируется и рассчитывается заранее, создавая точки жесткости, при этом высота изделия сохраняется.

Изготовление изделий из фотополимера с растром (рис. 5) заключается в следующем. Растр (растровое изображение) 2 укладывается на стекло в сторону жидкой композиции, накрывают тонкой (6–12 мкм) защитной пленкой 3 во избежание контакта с жидкой композицией 4, нагретой до определенной температуры [12]. При экспонировании поток ультрафиолетовых излучений люминесцентных или газоразрядных ламп 6, проходящий через прозрачные участки негатива, полимеризует жидкую композицию на элементах 5, превращая ее в твердый полимер. На пробельных участках, где свет не действовал, композиция остается в первоначальном жидком состоянии. Для создания основы формы изделия композицию освещают такими же лампами с обратной стороны, что приводит к образованию прочной твердой основы 7. После экспонирования жидкую композицию удаляют с пробельных участков сжатым воздухом или вымывают [13–20].

Нами использовались растры с 30 и 100 dpi, что является максимальной разрешающей способностью используемого фотополимера (рис. 6 и 7).

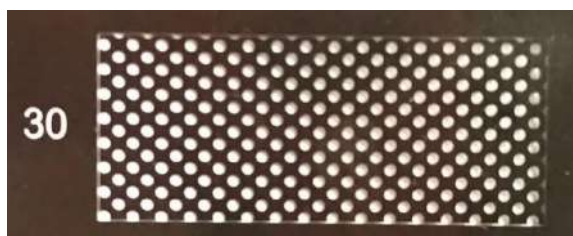


Рис. 6. Растровое изображение с разрешающей способностью 30 dpi
Fig. 6. Raster image with resolution of 30 dpi



Рис. 7. Растровое изображение с разрешающей способностью 100 dpi
Fig. 7. Raster image with resolution of 100 dpi

Проведенные экспериментальные исследования показывали, что твердость готового изделия из фотополимера с растровой точкой круглого сечения разрешением 30 dpi уменьшается на 10–15 %, с растром 100 dpi увеличивается на 5–9 %. Экспериментальные данные, представлены в таблице.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования подтверждают выдвинутую гипотезу об увеличении твердости изделий из фотополимера методом нанесения растровой точки. Причем твердость зависит от разрешения растра. Преимуществом данной методики является то, что твердость изделия можно планировать в зависимости от конструкционной необходимости, а нанесение упрочняющего слоя не оказывает влияния на геометрические размеры изделия.

Расширение возможности варьирования твердостью готового изделия из фотополимеров было определено, как сочетание изделий с растром и композитами, поэтому задачей следующих исследований и экспериментов является выбор и изучение композиционных материалов (композита) на основе полиакрилата.

Результаты экспериментов (твердость при 30 и 100 dpi, НЛ)
Experimental results (hardness at 30 and 100 dpi, HL)

Эксперимент	Фотополимер	Фотополимер с растром (растровым упрочнением) 30 dpi	Фотополимер с растром (растровым упрочнением) 100 dpi
	HL	HL	HL
1	581	457	633
2	637	585	640
3	609	560	636
4	589	507	601
5	606	554	632

Список литературы

1. Соколов Л.Б. Основы синтеза полимеров методом поликонденсации. М. : Химия, 1979. 264 с.
2. Фотополимер фирмы Roehm R-50 // Old4.ru : сайт. URL: [http // www.old4.ru / catalog / rashodnye_materialy / polimery / djiddkii_polimer_roehm](http://www.old4.ru/catalog/rashodnye_materialy/polimery/djiddkii_polimer_roehm) (дата обращения: 28.07.2021).
3. Фотополимер PHOTOPOLYMER R-50 // САМФО : сайт. URL: <http://samfo.ru/products/fotopolimer-r-50> (дата обращения: 28.07.2021).
4. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение : учеб. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.
5. Мэттьюс Ф., Роллингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. М. : Техносфера, 2004. 408 с.
6. Основы материаловедения (металлообработка) : учеб. для студентов сред. проф. образования / В.Н. Заплатин, Ю.И. Сапожников, А.В. Дубов и др. М. : Академия, 2017. 272 с.
7. Пат. 2571305. Рос. Федерация. Способ определения толщины наклёпанного слоя / В.И. Болобов, В.С. Бочков. № 2014142856/28 ; заявл. 23.10.2014 ; опубл. 20.12.2015. Бюл. № 35.
8. Пат. 2018124439 Рос. Федерация. Способ кавитационного наклепа и передвижное устройство для его осуществления / Д.Г. Сандерс, А.Г. Торсон, Х.Т. Дип. № 2018124439 ; заявл. 04.07.2018 ; 13.01.2020. Бюл. № 2.
9. Филиппенко Н.Г., Буторин Д.В., Лившиц А.В. Определение фазовых и релаксационных переходов в полимерных материалах // Автоматизация. Современные технологии. 2017. № 71. Ч. 4. С. 171–175.
10. Пат. 132209. Рос. Федерация. Устройство диагностики деталей из полиамидных материалов / А.Г. Ларченко, А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко, С.И. Попов. № 2013115531/28 ; заявл. 05.04.2013 ; опубл. 10.09.2013. Бюл. № 25.
11. Высококачественная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья / А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко, А.Г. Ларченко и др. // Наука и образование. 2014. № 6. С. 55–65.
12. Laser alloying of wear surfaces with metal components / S.K. Kargapol'tsev, V.I. Shastin, V.E. Gozbenko, A.V. et al. // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 17. С. 6499–6503.
13. Полимеризация. Большая российская энциклопедия // Большая российская энциклопедия : сайт. URL: <https://bigenc.ru/chemistry/text/3153477> (Дата обращения: 28.07.2021).
14. Основы технологического процесса [Электронный ресурс]. URL: <http://www.prepress-book.narod.ru/Oborudovanie-dlja-izgotovlenija-form-vysokoj-i-fleksografskoj-pechati/Osnovy-tehnologicheskogo-processa.htm> (дата обращения: 28.07.2021).
15. Ляпков А.А. Полимерные аддитивные технологии: учеб. пособие. Томск : изд-во Томск. политехн. ун-та, 2016. 114 с.
16. Шкуро А.Е., Кривоногов П.С. Технологии и материалы 3D-печати. Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
17. Воробьев В.А., Андрианов Р.А. Технология полимеров : учеб. для вузов. М. : Высшая школа, 1980. 303 с.
18. Сутягин В.М., Бондалетова Л.И. Химия и физика полимеров : учебное пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2003. 208 с.
19. Зуев В.В., Успенская М.В., Олехнович А.О. Физика и химия полимеров. учеб. пособие. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2010. 45 с.
20. Пат. 2722902. Рос. Федерация. Способ формирования трехмерного изделия из жидкого фотополимера с применением преобразования волнового фронта актиничного излучения и устройство для его осуществления / О.Ю. Халип. № 2018139765 ; заявл. 01.09.2016. ; опубл. 04.06.2020. Бюл. № 16.

References

1. Sokolov L.B. Osnovy sinteza polimerov metodom polikondensatsii [Fundamentals of polymer synthesis by polycondensation]. Moscow: Khimiya, 1979. 264 p.
2. Fotopolimer firmy Roehm R-50 [Photopolymer of firm Roehm R-50]. URL: [http // www.old4.ru / catalog / rashodnye_materialy / polimery / djiddkii_polimer_roehm](http://www.old4.ru/catalog/rashodnye_materialy/polimery/djiddkii_polimer_roehm) (Accessed 28.07.21).
3. Fotopolimer PHOTOPOLYMER R-50 [Photopolymer PHOTOPOLYMER R-50]. URL: <http://samfo.ru/products/fotopolimer-r-50> (Accessed 28.07.21).
4. Bataev A.A., Bataev V.A. Kompozitsionnye materialy: stroenie, poluchenie, primeneniye [Composite materials: structure, production, application]. Textbook. Novosibirsk: Izdatel'stvo Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2002. 384 p.
5. Matthews F., Rollings R. Kompozitnye materialy. Mekhanika i tekhnologiya [Composite materials. Mechanics and Technology]. Moscow: Tekhnosfera, 2004. 408 p.
6. Zaplatin V.N., Sapozhnikov Yu.I., Dubov A.V. (eds). Fundamentals of materials science (metalworking): textbook for students of environments. prof. Education; edited by Zaplatina V.N. 8th ed., Erased. Moscow: Akademiya, 2017. 272 p.
7. Pat. 2571305. Rus. Federation. Sposob opredeleniya tolshhiny naklyopannogo sloya [Method for determining the thickness of the hardened layer]. Bolobov V.I., Bochkov V.S., bull. No. 35.
8. Pat. 2018124439. Rus. Federation. Sposob kavitatsionnogo naklepa i peredvizhnoye ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya [The method of cavitation work hardening and a mobile device for its implementation]. D.G. Sanders, A.G. Thorson, H.T. Deep. Bull. No 2.
9. Filipenko N.G., Butorin D.V., Livshits A.V. Opredelenie fazovykh i relaksatsionnykh perekhodov v polimernykh materialakh [Determination of phase and relaxation transitions in polymeric materials]. *Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii [Automation. Modern technologies]*, 2017, No 71, P. 4, pp. 171–175.
10. Pat. 132209. Rus. Federation. Ustrojstvo diagnostiki detalej iz poliamidnykh materialov [Device for diagnostics of parts made of polyamide materials]. A.G. Larchenko, A.V. Livshits, N.G. Filipenko, S.I. Popov. Bull. No 25.

11. Livshits A.V., Filippenko N.G., Larchenko A.G., Filatova S.N. Vysokochastotnaya ehlektrotermicheskaya obrabotka nemetallichesкого вторичного syr'ya [High-frequency electrothermal treatment of non-metallic secondary raw materials]. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2014, No. 6, pp. 55–65.
12. Kargapol'tsev S.K., Shastin V.I., Gozbenko V.E., Livshits A.V., Filippenko N.G. Laser alloying of wear surfaces with metal components. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, Vol. 12, No. 17, pp. 6499–6503.
13. Polimerizatsiya. Bol'shaya rossijskaya ehntsiklopediya [Polymerization. The Great Russian Encyclopedia]. URL: <https://bigenc.ru/chemistry/text/3153477> (Accessed 28.07.21).
14. Osnovy tekhnologicheskogo protsessa [Fundamentals of the technological process]. URL: <http://www.prepress-book.narod.ru/Oborudovanie-dlja-izgotovlenija-form-vysokoj-i-fleksografskoj-pechati/Osnovy-tekhnologicheskogo-processa.htm> (Accessed 28.07.21).
15. Lyapkov A.A. Polimernye additivnye tekhnologii [Polymer additive technologies]. Textbook. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta, 2016. 114 p.
16. Shkuro A.E., Krivonogov P.S. Tekhnologii i materialy 3D-pechati [Technologies and materials for 3D printing]. Textbook. Yekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo gosudarstvennogo lesotekhnicheskogo universiteta, 2017. 1 electron. wholesale disc (CD-ROM).
17. Vorobiev V.A., Andrianov R.A. Tekhnologiya polimerov [Polymer technology]. Textbook for universities. Moscow: Vyshaya Shkola Publ., 1980. 303 p.
18. Sutyagin V.M., Bondaletova L.I. KHimiya i fizika polimerov [Chemistry and Physics of Polymers]. Textbook. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta, 2003. 208 p.
19. Zuev V.V., Uspenskaya M.V., Olekhovich A.O. Fizika i khimiya polimerov [Physics and chemistry of polymers]. Textbook. Saint Petersburg: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki, 2010. 45 p.
20. Pat. 2722902. Rus. Federation. Sposob formirovaniya trekhmernogo izdeliya iz zhidkogo fotopolimera s primeneniem preobrazovaniya volnovogo fronta aktinichnogo izlucheniya i ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya [A method of forming a three-dimensional product from a liquid photopolymer using the transformation of the wavefront of actinic radiation and a device for its implementation] / O.Yu. Khalip, bull. No. 16.

Информация об авторах

Филиппенко Николай Григорьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ifpi@mail.ru.

Чумбадзе Тамара Темуриевна – аспирант, кафедра автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: tamriko98@yandex.ru.

Беломестных Артем Александрович – аспирант, кафедра автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: artiom.belomestnyh@yandex.ru.

Пискажова Татьяна Валериевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации производственных процессов в металлургии, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: TPiskazhova@sfu-kras.ru.

Information about the authors

Nikolay G. Filippenko – Ph.D. in Engineering Sciences, associate Professor of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ifpi@mail.ru.

Tamara T. Chumbadze – Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: tamriko98@yandex.ru.

Artem A. Belomestnykh – Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: artiom.belomestnyh@yandex.ru.

Tatyana V. Piskazhova – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Subdepartment of Automation of Production Processes in Metallurgy, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: TPiskazhova@sfu-kras.ru.

Инженерная методика расчета рациональных геометрических размеров уплотнительного соединения с тонкостенными элементами

Ю. И. Белоголов ✉

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

✉ pr-mech@mail.ru

Резюме

Металлические тонкостенные элементы находят широкое применение в уплотнительных соединениях различных инженерных конструкций. Происходит это вследствие возрастания требований к эксплуатационным характеристикам затворов, обеспечивающих герметичность в «агрессивной» среде при высоких давлениях. В таких условиях ресурс металлополимерных уплотнительных соединений снижается. Применение тонкостенных оболочек в затворах позволяет обеспечить усилие герметизации, достигаемое в металлополимерных уплотнительных соединениях, обеспечить равномерность распределения контактного давления в уплотнительном стыке, минимизировать усилие привода. Основным недостатком соединений с тонкостенными оболочками является их низкая устойчивость к силовому (ударному) нагружению со стороны «золотника» (подвижной части затвора). Компенсация «чувствительности» тонкостенной оболочки к такому нагружению может быть достигнута за счет снижения ее приведенной жесткости. Достигается это путем соединения тонкостенной оболочки и пластины, которая по контуру имеет жесткую заделку. Снижая жесткость тонкостенного элемента (оболочечно-пластинчатого), требуется провести расчет соединения с целью определения рациональных геометрических размеров (толщины) и обеспечения его прочности. Расчетам тонкостенных оболочек и пластин посвящено много трудов. Отсутствие научно обоснованных методик расчета рациональных геометрических размеров тонкостенных уплотнений сдерживает их применение в арматуростроении. Сложность разработки методики расчета обусловлена тем, что такая задача аналитического решения обычно не имеет. В статье подробно рассматривается расчет приведенной жесткости тонкостенного уплотнения. Разработанная методика позволяет поставить задачу оптимизации. Кроме того, сделаны уточнения при расчете фланцевых соединений и действии давления рабочей среды.

Ключевые слова

трубопроводная арматура, клапан, тонкостенная оболочка, тонкостенная пластина, упругая кромка, герметизирующая нагрузка, соединения «метал – металл», функции А. Н. Крылова

Для цитирования

Белоголов Ю. И. Инженерная методика расчета рациональных геометрических размеров уплотнительного соединения с тонкостенными элементами // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 25–33. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).25-33

Информация о статье

поступила в редакцию: 23.09.2021, поступила после рецензирования: 02.10.2021, принята к публикации: 10.10.2021

Engineering technique for calculating rational geometric dimensions of a sealing joint with thin-walled elements

Yu. I. Belogolov ✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ pr-mech@mail.ru

Abstract

Thin-walled metal elements are widely used in sealing joints of various engineering structures. This is due to the increasing requirements for the performance characteristics of shutters that ensure tightness in an "aggressive" environment at high pressures. Under such conditions, the resource of metal-polymer sealing joints is reduced. The use of thin-walled shells in the shutters provides the sealing force achieved in metal-polymer sealing joints as well as the uniform distribution of the contact pressure in the sealing joint, and minimizes the drive force. The main disadvantage of joints with thin-walled shells is their low resistance to force (shock) loading from the "spool" (movable part of the gate). The "sensitivity" of a thin-walled shell to such loading can be compensated by lowering its reduced stiffness. This is achieved by connecting the thin-walled shell and the plate, which has a rigid termination along the contour. When reducing a rigidity of a thin-walled element (shell-plate), the calculation of the connection is required in order to determine the rational geometric dimensions (thickness) and ensure its strength. Many works are devoted to the calculations of thin-walled shells and plates. The lack of scientifically grounded methods for calculating the rational geometric dimensions of thin-walled seals hinders their use in the valve industry. The complexity of developing a calculation method is due to the fact that such problem usually does not have an analytical solution. In the article the calculation of the reduced stiffness of a thin-walled seal is considered in detail. The developed technique makes it possible to formulate an optimization problem. In addition, clarifications were made when calculating flange connections and the effect of pressure of the working medium.

Keywords

pipeline fittings, valve, thin-walled shell, thin-walled plate, elastic edge, sealing load, metal-to-metal connections, functions of A.N. Krylov

For citation

Belogolov Yu.I. Inzhenernaya metodika rascheta ratsional'nykh geometricheskikh razmerov uplotnitel'nogo soyedineniya s tonkostennymi elementami [Engineering technique for calculating rational geometric dimensions of a sealing joint with thin-walled elements]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 25–33. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).25-33

Article Info

Received: 23.09.2021, Revised: 02.10.2021, Accepted: 10.10.2021

Введение

Уплотнительные соединения с использованием тонкостенных элементов находят широкое применение не только в арматуростроении, но и в авиационной технике, железнодорожном транспорте и других отраслях.

К преимуществам таких соединений можно отнести компенсацию отклонений формы и взаимного расположения, монтажных и температурных деформаций уплотнительных поверхностей в результате упругой деформации тонкостенной кромки.

На рис. 1 представлена схема затвора клапана с коническим золотником, тонкостенной оболочкой (а) и тонкостенной пластиной (б) в качестве седла.

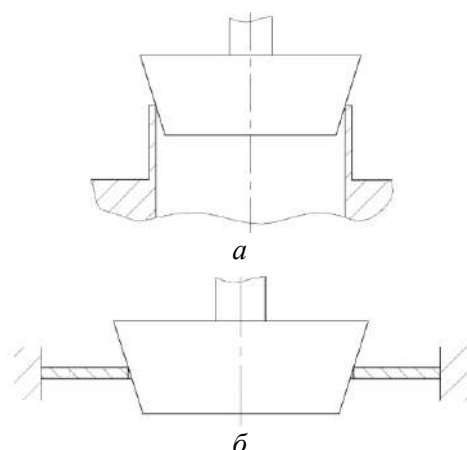


Рис. 1. Схема затвора:

а – с оболочечным седлом; б – с пластинчатым седлом

Fig. 1 Scheme of a gate:

a – with a shell seat, b – with a slatter seat

Оболочка в трубопроводной арматуре используется в уплотнительных соединениях (УС), работающих при высоких давлениях, температурах, различном химическом составе рабочих сред. Конструкции УС с оболочечным седлом подробно рассмотрены в [1–3].

Статическому расчету оболочечных соединений, основанному на гипотезах Кирхгофа – Лява посвящено много работ и трудов [4–7]. Исследованиям динамического (ударного) нагружения оболочечных соединений посвящены [8–10].

Теория расчета оболочек (рис. 2) при осесимметричной деформации основывается на гипотезах Кирхгофа – Лява:

1. Гипотеза неизменности нормалей.

2. Гипотеза о ненадавливании одного слоя оболочки на другой.

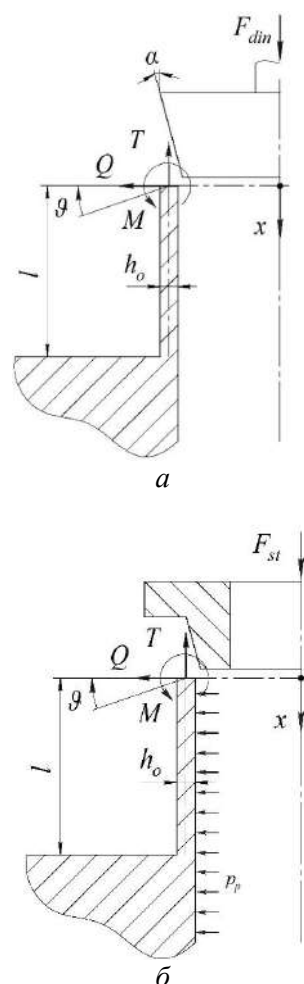


Рис. 2. Расчетная схема оболочки:

а – клапанного уплотнительного соединения;

б – фланцевого уплотнительного соединения

Fig. 2. Calculated scheme of a shell:

a – valve sealing joint; b – flange sealing joint

Согласно [11], уравнение деформации осесимметрично нагруженной оболочки имеет вид:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = -\frac{\mu T}{rD} + \frac{p}{D}, \quad (1)$$

где $\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{(r^2 h^2)}}$ – параметр оболочечного элемента.

Общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$w = A_0 e^{(\beta+\beta l)x} + A_1 e^{(-\beta+\beta l)x} + A_2 e^{(-\beta-\beta l)x} + A_3 e^{(\beta-\beta l)x},$$

где A_0, A_1, A_2, A_3 – постоянные интегрирования.

Для упрощения нахождения постоянных, решение дифференциального уравнения представляют в виде функций А.Н. Крылова, которые определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} K_0(\beta x) &= \cosh(\beta x) \cdot \cos(\beta x); \\ K_1(\beta x) &= \frac{1}{2} \cdot (\cosh(\beta x) \cdot \sin(\beta x) + \sinh(\beta x) \cos(\beta x)); \\ K_2(\beta x) &= \frac{1}{2} \cdot \sinh(\beta x) \cdot \sin(\beta x); \\ K_3(\beta x) &= \frac{1}{4} \cdot (\cosh(\beta x) \cdot \sin(\beta x) - \sinh(\beta x) \cdot \cos(\beta x)). \end{aligned}$$

Тогда общее дифференциальное уравнение (1) преобразуется к виду:

$$w = A_0 K_0(\beta x) + A_1 K_1(\beta x) + A_2 K_2(\beta x) + A_3 K_3(\beta x) + w^*, \quad (2)$$

где w^* – частное решение, которое зависит от закона распределения поверхностных нагрузок и равно

$$-\frac{\mu T r}{E h} + \frac{p_p}{D}.$$

Функции А.Н. Крылова связаны между собой простыми дифференциальными соотношениями [9, 11]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} K_0(\beta x) &= -4\beta K_3(\beta x); \\ \frac{d}{dx} K_1(\beta x) &= \beta K_0(\beta x); \\ \frac{d}{dx} K_2(\beta x) &= \beta K_1(\beta x); \\ \frac{d}{dx} K_3(\beta x) &= \beta K_2(\beta x). \end{aligned} \quad (3)$$

При значении аргумента, равном нулю, все они обращаются в ноль, кроме K_0 , который обращается в единицу:

$$K_0(0) = 1; K_1(0) = 0; K_2(0) = 0; K_3(0) = 0.$$

Функции А.Н. Крылова позволяют выразить постоянные интегрирования через начальные параметры w, ϑ, M, Q .

Дифференцирование уравнение (2), согласно [2, 9], с использованием (3) приводим к следующему решению:

$$w(x) = A_0 K_0(\beta x) + A_1 K_1(\beta x) + A_2 K_2(\beta x) + A_3 K_3(\beta x) + w^*;$$

$$w'(x) = \vartheta(x) = \beta[-4A_0 A_3(\beta x) + A_1 K_0(\beta x) + A_2 K_1(\beta x) + A_3 K_2(\beta x)];$$

$$w''(x) = \frac{M(x)}{D_0} = \beta^2[-4A_0 K_2(\beta x) - 4A_1 K_3(\beta x) + A_2 K_0(\beta x) + A_3 K_1(\beta x)];$$

$$w'''(x) = \frac{Q}{D_0} = \beta^3[-4A_0 K_1(\beta x) - 4A_1 K_2(\beta x) - 4A_2 K_3(\beta x) + A_3 K_0(\beta x)].$$

Определение постоянных сводится к решению системы двух уравнений с двумя неизвестными, так как два начальных условия обычно бывают известны.

Исходя из указанного, граничные условия для оболочки принимаются в виде:

$$x = 0: w''(0) = 0; w'''(0) = \frac{Q}{D_0};$$

$$x = l: w'(l) = \vartheta_0; w''(l) = \frac{M_{s0}}{D_0}.$$

Подставляя первые два граничных условия, находим:

$$A_2 = 0; A_3 = \frac{Q}{D_0 \beta^3}$$

Наряду с оболочками пластины также нашли широкое применение в трубопроводной арматуре (фланцы, седла, упоры и т. д.).

Общие вопросы статического расчета пластин изложены в работах [4, 7, 11, 12] и др.

Расчет пластин на прочность и устойчивость методом сеток рассматривается в работе [13].

Теория расчета пластин на изгиб основывается на гипотезах Кирхгофа, аналогичных гипотезам Кирхгофа – Лява при осесимметричной деформации цилиндрических оболочек – о неизменности нормали и ненадавливании одного слоя пластины на другой [11].

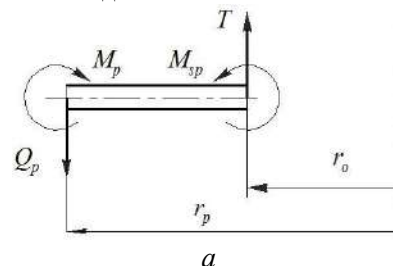
Кроме этого часто принимаются допущения:

– толщина пластины по сравнению с другими размерами мала;

– прогиб пластины по сравнению с толщиной мал;

– материал пластины – однородный, изотропный и подчиняется закону Гука [14, 15].

При осесимметрично нагружении круглой пластины все величины являются функциями только текущего радиуса (рис. 3), что обуславливает одномерность таких задач.



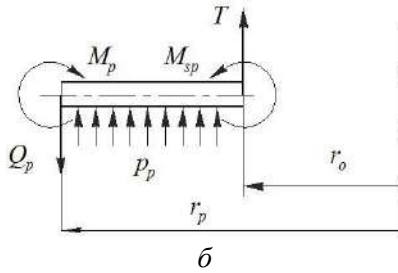


Рис. 3. Расчетная схема пластины:

a – клапанного уплотнительного соединения;
b – фланцевого уплотнительного соединения

Fig. 3. Calculated scheme of a plate:

a – valve sealing joint; *b* – flange sealing joint

Поперечная сила Q может быть определена при рассмотрении равновесия части пластины. Изгибающие моменты M_r, M_t получают при интегрировании напряжений по площади граней элемента пластины:

$$M_r = D \left(\frac{d\vartheta}{dr} + \mu \frac{\vartheta}{r} \right); M_t = D \left(\frac{\vartheta}{r} + \mu \frac{d\vartheta}{dr} \right),$$

где D – изгибная жесткость пластины, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$.

Преобразование системы с четырьмя неизвестными позволяет получить дифференциальное уравнение второго порядка деформирования пластинчатого элемента относительно функции ϑ :

$$\frac{d^2\vartheta}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\vartheta}{dr} - \frac{\vartheta}{r^2} = \frac{Q}{D}.$$

Решение дифференциального уравнения деформирования пластинчатого элемента принимается в виде [1]:

$$\vartheta = C_1 r + \frac{C_2}{r} + \frac{1}{Dr} \int [\hat{r} \int Q d\tilde{r}] d\tilde{r},$$

где \tilde{r} и \hat{r} – вспомогательные переменные.

Значения постоянных интегрирования C_1 и C_2 , определяют для каждого частного случая по граничным условиям на наружном и внутреннем краю пластины.

Граничные условия для пластины будут:

– по наружному краю пластина жестко заделана, т. е. при $r_p = R_p$ $\vartheta_{sp} = 0$;

– по внутреннему радиусу r_o пластины приложен момент M_{sp} :

$$M_{sp} = D_p \left(\frac{d\vartheta_{sp}}{dr_p} + \mu \frac{\vartheta_{sp}}{r_p} \right) \Big|_{r_p=r_o}.$$

Подставляя Q_p в общий интеграл, получим угол поворота нормали для клапанного УС (рис. 3, *a*):

$$\vartheta_{sp} = C_1 r_p + \frac{C_2}{r_p} + \frac{1}{D_p r_p} \int [\hat{r} \int T \frac{r_o}{\tilde{r}} d\tilde{r}] d\hat{r},$$

окончательно запишем:

$$\vartheta_{sp} = C_1 r_p + \frac{C_2}{r_p} + \frac{T r_o}{D_p} \left[\frac{r_p}{2} \ln r_p - \frac{r_p}{4} \right].$$

Для устранения логарифма размерной величины добавим и вычтем $\frac{T r_o r_p}{2 D_p} \ln R_p$:

$$\begin{aligned} \vartheta_{sp} &= C_1 r_p + \frac{C_2}{r_p} + \frac{T r_o r_p}{2 D_p} \ln r_p - \frac{T r_o r_p}{4 D_p} - \\ &\quad - \frac{T r_o r_p}{2 D_p} \ln R_p + \frac{T r_o r_p}{2 D_p} \ln R_p, \\ \vartheta_{sp} &= C_1 r_p + \frac{C_2}{r_p} + \frac{T r_o r_p}{2 D_p} \ln \frac{r_p}{R_p}. \end{aligned}$$

В этом уравнении все слагаемые, содержащие r в первой степени, отнесены к постоянной интегрирования C_1 .

$$\begin{aligned} \vartheta_{sp} &= C_1 r_p + \frac{C_2}{r_p} + \frac{T r_o r_p}{2 D_p} \ln \frac{r_p}{R_p}; \\ \frac{d\vartheta_{sp}}{dr_p} &= C_1 + \frac{C_2}{r_p^2} + \frac{T r_o}{2 D_p} + \frac{T r_o}{2 D_p} \ln \frac{r_p}{R_p}; \\ M_{sp} &= D_p \left[C_1 - \frac{C_2}{r_p^2} + \frac{T r_o}{2 D_p} + \frac{T r_o}{2 D_p} \ln \frac{r_p}{R_p} + \right. \\ &\quad \left. + \mu C_1 + \mu \frac{C_2}{r_p^2} + \mu \frac{T r_o}{2 D_p} \ln \frac{r_p}{R_p} \right] = \\ &= D_p \left[C_1 (1 + \mu) - \frac{C_2}{r_p^2} (1 - \mu) + \frac{T r_o}{2 D_p} + \right. \\ &\quad \left. + (1 + \mu) \frac{T r_o}{2 D_p} \ln \frac{r_p}{R_p} \right]. \end{aligned}$$

Если требуется учесть давление рабочей среды (рис. 2, *b*), то решение дифференциального уравнения деформирования пластины примет вид:

$$\begin{aligned} \vartheta_{sp} &= C_1 r_p + \frac{C_2}{r_p} + \\ &+ \frac{1}{D_p r_p} \int_{r_o}^{\hat{r}} \left[\hat{r} \int_{r_o}^{\tilde{r}} T \frac{r_o}{\tilde{r}} + \frac{p_p}{2\tilde{r}} (\tilde{r}^2 - r_o^2) d\tilde{r} \right] d\hat{r}. \end{aligned}$$

Вычислив интеграл, можно получить значение угла поворота нормали и его производной:

$$\begin{aligned} \vartheta_{sp} &= \\ &C_1 r_p + \frac{C_2}{r_p} + \frac{T r_o r_p}{2 D_p} \ln \left(\frac{r_p}{R_p} \right) + \\ &\quad + \frac{p_p}{16 D_p} \left(\frac{r_p^4 - r_o^4}{r_p} + 4 r_o^2 r_p \ln \left(\frac{r_o}{r_p} \right) \right), \\ \frac{d\vartheta_{sp}}{dr_p} &= C_1 - \frac{C_2}{r_p^2} + \frac{p_p}{16 D_p} \left(3 r_p^2 - 4 r_o^2 + \frac{r_o^4}{r_p^2} + \right. \\ &\quad \left. 4 r_o^2 \ln \left(\frac{r_o}{r_p} \right) \right) + \frac{T r_o}{2 D_p} + \frac{T r_o}{2 D_p} \ln \left(\frac{r_p}{R_p} \right), \\ M_{sp} &= D_p \left[C_1 - \frac{C_2}{r_p^2} + \frac{p_p}{16 D_p} \left(3 r_p^2 - 4 r_o^2 + \frac{r_o^4}{r_p^2} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 4 r_o^2 \ln \left(\frac{r_o}{r_p} \right) \right) + \frac{T r_o}{2 D_p} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{T r_o}{2 D_p} \ln \left(\frac{r_p}{R_p} \right) + \mu C_1 + \frac{\mu C_2}{r_p^2} + \right. \end{aligned}$$

$$+ \frac{\mu T r_o}{2D_p} \ln\left(\frac{r_p}{R_p}\right) + \frac{\mu p_p}{16D_p r_p} \left(\frac{r_p^4 - r_o^4}{r_p} + 4r_o^2 r_p \ln\left(\frac{r_o}{r_p}\right) \right) \Bigg],$$

окончательно запишем:

$$M_{sp} = C_1 D_p (1 + \mu) - \frac{C_2 D_p}{r_p^2} (1 - \mu) + \frac{p_p r_o^2}{4} \left(\ln\left(\frac{r_o}{r_p}\right) (1 + \mu) + \frac{r_o^2 (1 - \mu)}{4r_p^2} - 1 \right) + \frac{p_p r_p^2}{16} (3 + \mu) + \frac{T r_o}{2} \left(1 + \ln\left(\frac{r_p}{R_p}\right) (1 + \mu) \right).$$

Условия совместности деформаций пластины и оболочки

Условия совместности деформаций (рис. 4) пластины и оболочки:

$$M_{so}(l) = M_{sp}(r_o); Q_{so}(l) = Q_{sp}(r_o); w(l) = \Delta r_p(r_o); \vartheta_{so}(l) = \vartheta_{sp}(r_o).$$

Относительно третьего условия совместности деформаций следует отметить, что перемещение пластины $\Delta r_p(r_o)$ возникает вследствие растяжения ее силами Q_{sp} , при этом все точки пластины находятся в состоянии равномерного растяжения с напряжением $\sigma = \frac{Q_{sp}}{h_p}$ [16].

С учетом обобщенного закона Гука $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} (1 - \mu)$.

$$\Delta r_p = \varepsilon r_o = \frac{Q_{sp} (R_p - r_o)}{E h_p} (1 - \mu).$$

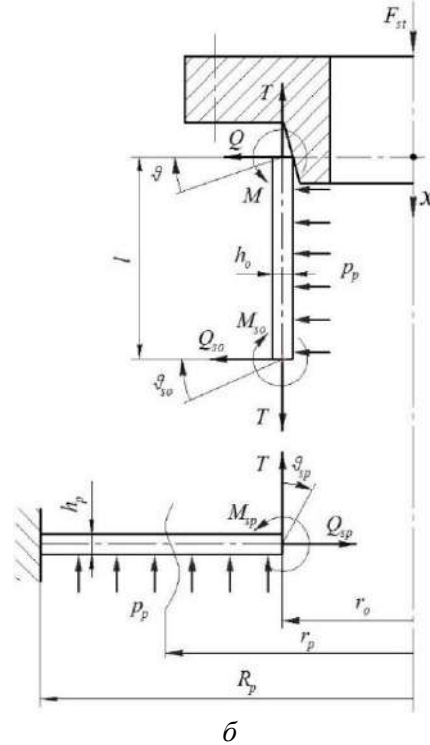


Рис. 4. Расчетная схема оболочечно-пластинчатого седла:

a – клапанного уплотнительного соединения; *б* – фланцевого уплотнительного соединения
Fig. 4. Calculated scheme of a shell-slatter seat: *a* – valve sealing joint; *b* – flange sealing joint

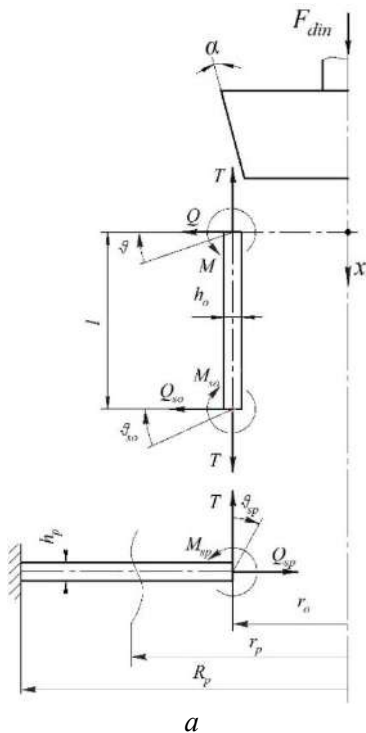
Условие совместности деформаций клапанного УС запишем в следующем виде:

$$D_o \beta^2 \left[-4A_0 K_2(\beta l) - 4A_1 K_3(\beta l) + \frac{Q}{D_o \beta^3} K_1(\beta l) \right] = D_p \left[C_1 (1 + \mu) - \frac{C_2}{r_o^2} (1 - \mu) + \frac{T r_o}{2D_p} + (1 + \mu) \frac{T r_o}{2D_p} \ln \frac{r_o}{R_p} \right]. \tag{4}$$

Для фланцевого УС первое условие определяется из:

$$D_o \beta^2 \left[-4A_0 K_2(\beta l) - 4A_1 K_3(\beta l) + \frac{Q_{st}}{D_o \beta^3} K_1(\beta l) \right] = C_1 D_p (1 + \mu) - \frac{C_2 D_p}{r_o^2} (1 - \mu) + \frac{p_p r_o}{4} \left(1 - \frac{1 - \mu}{4} \right) - \frac{p_p r_o^2}{16} (3 + \mu) + \frac{T_{st} r_o}{2} \left(1 + \ln \frac{r_o}{R_p} (1 + \mu) \right).$$

Объединяя второе и третье условие совместности для клапанного УС получим:



$$A_0 K_0(\beta l) + A_1 K_1(\beta l) + \frac{Q}{D_o \beta^3} K_3(\beta l) - \frac{\mu T r_o}{E h_o} =$$

$$= \frac{(R_p - r_o)}{E h_o} (1 - I) \times$$

$$\times D_o \beta^3 \left[-4A_0 K_1(\beta l) - 4A_1 K_2(\beta l) + \frac{Q}{D_o \beta^3} K_0(\beta l) \right]. \quad (5)$$

Для фланцевого УС второе и третье условия запишутся в виде:

$$A_0 K_0(\beta l) + A_1 K_1(\beta l) + \frac{Q_{st}}{D_o \beta^3} K_3(\beta l) -$$

$$\left(p_p - \frac{\mu T_{st}}{r_o} \right) \frac{r_o^2}{E h_o} =$$

$$\frac{(R_p - r_o)}{E h_o} (1 - \mu) D_o \beta^3 \left[-4A_0 K_1(\beta l) - \right.$$

$$\left. 4A_1 K_2(\beta l) + \frac{Q_{st}}{D_o \beta^3} K_0(\beta l) \right]. \quad (6)$$

Четвертое условие совместности для клапанного УС:

$$C_1 r_o + \frac{C_2}{r_o} + \frac{T r_o^2}{2D_p} \ln \frac{r_o}{R_p}$$

$$= \beta \left[-4A_0 K_3(\beta l) + A_1 K_0(\beta l) \right. \quad (7)$$

$$\left. + \frac{Q}{D_o \beta^3} K_2(\beta l) \right].$$

$$C_1 R_p + \frac{C_2}{R_p} = 0. \quad (8)$$

Для фланцевого УС четвертое условие совместности будет определяться из выражения:

$$C_1 r_o + \frac{C_2}{r_o} + \frac{T_{st} r_o^2}{2D_p} \ln \frac{r_o}{R_p} = \beta \left[-4A_0 K_3(\beta l) + \right.$$

$$\left. + A_1 K_0(\beta l) + \frac{Q_{st}}{D_o \beta^3} K_2(\beta l) \right];$$

$$C_1 R_p + \frac{C_2}{R_p} = -\frac{p_p}{16D_p} \left(\frac{R_p^4 - r_o^4}{R_p} \right.$$

$$\left. - 4r_o^2 R_p \ln \left(\frac{R_p}{r_o} \right) \right),$$

т. е. получаем системы из четырех уравнений для нахождения четырех постоянных интегрирования C_1 ; C_2 ; A_1 ; A_2 для клапанного УС и фланцевого УС.

Подставив значения $C_2 = -C_1 R_p^2$ (8) и $Q_{st} = -\frac{T_{st}}{\text{tg}(\alpha + \phi)}$ в уравнения (4), (5) и (7), можно полученный результат для клапанного УС представить в виде системы из трех уравнений:

$$\begin{cases} a_1 A_0 + a_2 A_1 + a_3 C_1 = e_1; \\ b_1 A_0 + b_2 A_1 + 0 + 0 = e_2; \\ d_1 A_0 + d_2 A_1 + d_3 C_1 = e_3, \end{cases}$$

где $a_1 = -4D_o \beta^2 K_2(\beta l)$; $a_2 = -4D_o \beta^2 K_3(\beta l)$;

$$a_3 = \left[-D_p(1 + \mu) - \frac{D_p R_p^2}{r_o^2} (1 - \mu) \right];$$

$$e_1 = T \left[\frac{K_1(\beta l)}{\text{tg}(\alpha + \phi) \beta} + \frac{r_o}{2} + \frac{(1 + \mu) r_o}{2} \ln \frac{r_o}{R_p} \right];$$

$$b_1 = \left[K_0(\beta l) + \frac{R_p - r_o}{E h_o} (1 - \mu) D_o \beta^3 4K_1(\beta l) \right];$$

$$b_2 = \left[K_1(\beta l) + \frac{R_p - r_o}{E h_o} (1 - \mu) D_o \beta^3 \cdot 4K_2(\beta l) \right];$$

$$e_2 =$$

$$T \left[\frac{K_3(\beta l)}{\text{tg}(\alpha + \phi) D_o \beta^3} + \frac{\mu r_o}{E h_o} - \frac{(R_p - r_o)}{E h_o} \frac{(1 - \mu)}{\text{tg}(\alpha + \phi)} K_0(\beta l) \right];$$

$$d_1 = -4\beta K_3(\beta l);$$

$$d_2 = \beta K_0(\beta l); d_3 = \left[\frac{R_p^2}{r_o} - r_o \right];$$

$$e_3 = T \left[\frac{r_o^2}{2D_p} \ln \frac{r_o}{R_p} + \frac{\beta}{D_o \beta^3 \text{tg}(\alpha + \phi)} K_2(\beta l) \right].$$

Постоянные интегрирования для клапанного УС определим из:

$$A_0 = \begin{vmatrix} e_1 & a_2 & a_3 \\ e_2 & b_2 & b_3 \\ e_3 & c_2 & c_3 \end{vmatrix}$$

$$A_1 = \begin{vmatrix} a_1 & \Delta & a_3 \\ b_1 & e_2 & b_3 \\ c_1 & e_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

$$C_1 = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & a_2 & e_1 \\ b_1 & b_2 & e_2 \\ c_1 & c_2 & e_3 \end{vmatrix}}{\Delta},$$

$$\text{где } \Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix}.$$

В случае расчета фланцевого УС система будет состоять из четырех уравнений и примет вид:

$$\begin{cases} a_1 A_0 + a_2 A_1 + a_3 C_1 + a_4 C_2 = e_1 \\ b_1 A_0 + b_2 A_1 + 0 + 0 = e_2 \\ d_1 A_0 + d_2 A_1 + d_3 C_1 + d_4 C_2 = e_3 \\ 0 + 0 + t_3 C_1 + t_4 C_2 = e_4, \end{cases}$$

где $a_1 = -4D_o \beta^2 K_2(\beta l)$; $a_2 = -4D_o \beta^2 K_3(\beta l)$;

$$a_3 = -D_p(1 + \mu); a_4 = -\frac{D_p}{r_o^2} (1 - \mu);$$

$$e_1 = -\frac{Q}{\beta} K_1(\beta l) + \frac{p_p r_o}{4} \left(1 - \frac{1 - \mu}{4} \right) -$$

$$-\frac{p_p r_o^2}{16} (3 + \mu) + \frac{T r_o}{2} \left(1 + \ln \frac{r_o}{R_p} (1 + \mu) \right);$$

$$b_1 = \left[K_0(\beta l) + \frac{R_p - r_o}{E h_o} (1 - \mu) D_o \beta^3 4K_1(\beta l) \right];$$

$$b_2 = \left[K_1(\beta l) + \frac{R_p - r_o}{E h_o} (1 - \mu) D_o \beta^3 \cdot 4K_2(\beta l) \right];$$

$$e_2 = \frac{Q}{D_o \beta^3} \left(K_0(\beta l) \frac{R_p - r_o}{E h_o} - K_3(\beta l) \right) +$$

$$+ \left(p_p - \frac{\mu T}{r_o} \right) \frac{r_o^2}{E h_o};$$

$$d_1 = -4\beta K_3(\beta l); d_2 = \beta K_0(\beta l); d_3 = r_o,$$

$$d_4 = -1/r_o e_3 = -\frac{Q}{D_o} K_2(\beta l) \beta + \frac{T r_o^2}{2D_p} \ln \frac{r_o}{R_p};$$

$$t_3 = R_p,$$

$$t_4 = -\frac{1}{R_p}; e_4 = \frac{p_p}{16D_p} \left(\frac{R_p^4 - r_o^4}{R_p} - 4r_o^2 R_p \ln \left(\frac{R_p}{r_o} \right) \right).$$

Постоянные интегрирования для фланцевого УС определим из:

$$A_0 = \frac{\begin{vmatrix} e_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ e_2 & b_2 & b_3 & b_4 \\ e_3 & d_2 & d_3 & d_4 \\ e_4 & t_2 & t_3 & t_4 \end{vmatrix}}{\Delta}; A_1 = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & e_1 & a_3 & a_4 \\ b_1 & e_2 & b_3 & b_4 \\ d_1 & e_3 & d_3 & d_4 \\ t_1 & e_4 & t_3 & t_4 \end{vmatrix}}{\Delta};$$

$$C_1 = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & a_2 & e_1 & a_4 \\ b_1 & b_2 & e_2 & b_4 \\ d_1 & d_2 & e_3 & d_4 \\ t_1 & t_2 & e_4 & t_4 \end{vmatrix}}{\Delta}; C_2 = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & e_1 \\ b_1 & b_2 & b_3 & e_2 \\ d_1 & d_2 & d_3 & e_3 \\ t_1 & t_2 & t_3 & e_4 \end{vmatrix}}{\Delta};$$

$$\text{где } \Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \end{vmatrix}.$$

После определения постоянных интегрирования может быть вычислен прогиб пластинчатого элемента для клапанного и фланцевого УС из выражений (5) и (6) соответственно:

$$w_{sp,k} = C_2 \ln \frac{R_p}{r_o} - \frac{T_{st} r_o - 4C_1 D_p}{8D_p} (R_p^2 - r_o^2) - \frac{T_{st} r_o^3}{4D_p} \ln \frac{r_o}{R_p};$$

$$w_{sp} = C_3 - \int \vartheta_{sp} dr_p = \frac{p_p r_p^4}{64D_p} - \frac{\ln(r_p) (p_p r_o^4 - 16C_2 D_p)}{16D_p} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_p}\right) (p_p r_o^2 r_p^2 - 2Tr_o r_p^2)}{8D_p} + \frac{r_p^2 \left(p_p r_o^2 + 8C_1 D_p - 2Tr_o + 4Tr_o \ln\left(\frac{r_o}{R_p}\right) \right)}{16D_p}.$$

Радиальная жесткость оболочечного элемента c_2 и осевая жесткость пластинчатого элемента c_3 определяются из выражений:

$$c_2 = \frac{Q_{st}}{w(0)} = \frac{Q_{st}}{A_0 + w_*}; c_3 = \frac{2T_{st} \pi r_o}{w_{sp}}.$$

Приведенная жесткость для клапанного и фланцевого УС может быть определена:

$$c_{пр,к} = \frac{[c_1 + c_2 \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \phi)] c_3}{c_1 + c_2 \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \phi) + c_3}; c_{пр,ф} = \frac{c_2 \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \phi) c_3}{c_2 \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \phi) + c_3},$$

где c_1 – жесткость привода.

Ранее было указано, что определяющим параметром для обеспечения прочности тонкостенного оболочечно-пластинчатого седла клапанного УС является динамическая ударная нагрузка F_{din} .

В соответствии с [2, 9] и учетом изложенного для тонкостенного оболочечно-пластинчатого седла динамическая ударная нагрузка определяется из выражения:

$$F_{din} = F_{st} + \sqrt{F_{st}^2 + 2(E_k - E_\phi) \frac{[c_1 + c_2 \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \phi)] c_3}{c_1 + c_2 \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \phi) + c_3}}$$

с последующим разложением F_{din} на составляющие

$$T_{din} = -\frac{F_{din}}{2\pi r_o};$$

$$Q_{din} = \frac{F_{din}}{2\pi r_o \operatorname{tg}(\alpha + \phi)},$$

и выполнением прочностного расчета.

Заключение

После нахождения приведенной жесткости производится определение эквивалентных напряжений по четвертой гипотезе прочности.

Представленная инженерная методика позволяет поставить задачу [17–20] расчета рациональных геометрических размеров оболочечно-пластинчатого уплотнения, целевая функция которой будет $c_{np}(h_o, h_p) \rightarrow \min$.

Список литературы

1. Долотов А.М. Уплотнительные соединения с использованием тонкостенных элементов / А.М. Долотов, В.Е. Гозбенко, Ю.И. Белоголов; Иркут. гос. ун-т путей сообщ. Иркутск, 2011. 72 с. : ил. 78. Деп. в ВИНТИ 22. 11. 2011, № 508-B2011.
2. Долотов А.М. Основы теории и проектирования уплотнений пневмогидроарматуры летательных аппаратов : учеб. пособие / А. М. Долотов, П. М. Огар, Д. Е. Чегодаев. М. : Изд-во МАИ, 2000. 296 с. ISBN 5-7035-2307-9.
3. Кондаков Л.А. Уплотнения и уплотнительная техника : справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер и др. М. : Машиностроение, 1986. 464 с.

4. Тимошенко С.Л., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М. : ГИФМЛ, 1963. 635 с.
5. Гольденвейзер А.Л. Теория тонких упругих оболочек. М. : ГИТТД, 1953. 544 с.
6. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. М. : Машиностроение, 1974. 486 с.
7. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М. : Наука, 1967. 984 с.
8. Батуев Г.С. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.К. Ефремов и др. М. : Машиностроение, 1977. 240 с.
9. Долотов А.М. Разработка методов расчета и проектирование уплотнений с оболочечным элементом для летательных аппаратов : дис. ... док. тех. наук : 05.07.05, 05.02.02 / А. М. Долотов. М., 1994. 280 с.
10. Долотов А.М. Зацарный В.А. Расчет жесткости упругих затворов // Вестник Львов. политехн. ин-та. 1983. № 170. С. 65–66.
11. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин. М. : Машиностроение, 1973. 456 с.
12. Артюхин Ю.П. Решение задач нелинейного деформирования пластин и пологих оболочек методом граничных элементов / Ю.П. Артюхин, А.П. Грибов. Казань : Фэн, 2002. 199 с.
13. Чуватов В.В. Расчет пластинок на прочность и устойчивость методом сеток. Свердловск : УПИ, 1972. 107 с.
14. Беляев Н.М. Сопrotивление материалов М. : Наука, 1976. 608 с.
15. Вольмир А.С., Григорьев Ю.П., Станкевич А.И. Сопrotивление материалов : учебник для вузов. М. : Дрофа, 2007. ISBN 978-5-358-01283-7.
16. Расчеты на прочность в машиностроении : в 3-х т. / под ред. С.Д. Пономарева. М. : Машгиз, 1956-1959. 3 т.
17. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Определение перемещений в оболочечно-пластинчатом седле клапана // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 2 (18). С. 22–28.
18. Герасимов С.В., Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Математическая модель динамического нагружения двухседельного клапана // Тр. Брат. гос. ун-та. Братск, 2012. Сер. : Естественные и инженерные науки. С. 126–129.
19. Герасимов С.В., Долотов А.М., Саакян К.Г. Расчет седла уплотнительного соединения, нагруженного затвором и давлением герметизируемой среды // Механика XXI века : сб. докл. XI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. Братск, 2012. № 11. С. 106–111.
20. Долотов А.М. Белоголов Ю.И. Пути совершенствования клапанных уплотнительных соединений с оболочечными седлами // Энерго та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування : Матеріали 4-ої міжвузівської науково-технічної конференції викладачів, молодих вчених та студентів. Донецьк, 2012. С. 87–88.
21. Белоголов Ю.И. Совершенствование конструкций уплотнительных соединений с тонкостенными элементами (упругой кромкой) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Братск, 2013. 9 с.

References

1. Dolotov A.M., Gozbenko V.E., Belogolov Yu.I. Uplotnitel'nyye soyedineniya s ispol'zovaniyem tonkostennykh elementov [Sealing compound with thin elements]. Moscow: VINITI, 2011. 72 p.
2. Dolotov A.M., Ogar P.M., Chegodayev D.Ye. Osnovy teorii i proyektirovaniya uplotneniy pnevmogidroarmatury letatel'nykh apparatov: monografiya [Fundamentals of the theory and design of seals for pneumatic hydraulic fittings of aircraft: monograph]. Moscow: MAI, 2000. 296 p.
3. Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B., Gordeyev V.V., Furmanov B.A., Karmugin B.V. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: Spravochnik [Seals and sealing technology: a reference book]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1986. 464 p.
4. Timoshenko S.L., Voynovskiy-Kriger S. Plastinki i obolochki [Plates and shells]. Moscow: GIFML Publ., 1963. 635 p.
5. Gol'denveyzer A.L. Teoriya tonkikh uprugikh obolochek [Theory of thin elastic shells]. Moscow: GITTD Publ., 1953. 544 p.
6. Biderman V.L. Mekhanika tonkostennykh konstruksiy [Mechanics of thin-walled structures]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1974. 486 p.
7. Vol'mir A.S. Ustoychivost' deformiruyemykh system [Stability of deformable systems]. Moscow: Nauka Publ., 1967. 984 p.
8. Batuyev G.S., Golubkov Yu.V., Yefremov A.K., Fedosov A.A. Inzhenernyye metody issledovaniya udarnykh protsessov [Engineering methods for studying shock processes]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1977. 240 p.
9. Dolotov A.M. Razrabotka metodov rascheta i proyektirovaniye uplotneniy s obolochechnym elementom dlya letatel'nykh apparatov. dis. ... dok. tekh. nauk: 05.07.05, 05.02.02: zashchishchena 28.04.95 : utv. 28.07.95 [Development of calculation methods and design of seals with a shell element for aircraft engines: D. Sc. (Engineering) diss.: 05.07.05, 05.02.02]. Moscow: BMSTU Publ., 1994. 280 p.
10. Dolotov A.M. Zatsarnyy V.A. Raschet zhestkosti uprugikh zatvorov [Calculation of the stiffness of elastic gates] // Vestnik Lvovskogo politekhnicheskogo instituta [Bulletin of the Lviv Polytechnic Institute], No 170. L'vov: Vishcha shkola, 1983. Pp 65–66.
11. Boyarshinov S.V. Osnovy stroitel'noy mekhaniki mashin [Fundamentals of structural machine mechanics]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1973. 456 p.
12. Artyukhin Yu.P., Gribov A.P. Resheniye zadach nelineynogo deformirovaniya plastin i pologikh obolochek metodom granichnykh elementov [Solving problems of nonlinear deformation of plates and shallow shells by the method of boundary elements]. Kazan: Fen Publ., 2002. 199 p.
13. Chuvатов V.V. Raschet plastinok na prochnost' i ustoychivost' metodom setok [Calculation of plates for strength and stability by the method of meshes]. Sverdlovsk: UPI Publ., 1972. 107 p.

14. Belyayev N.M. Soprotivleniye materialov [Strength of materials]. Moscow: Nauka Publ., 1976. 608 p.
15. Vol'mir A.S., Grigor'yev Yu.P., Stankevich A.I. Soprotivleniye materialov : uchebnik dlya vuzov [Resistance of materials: textbook for universities]. Moscow: Drofa Publ., 2007. 591 p.
16. Ponomarev S.D., Biderman V.L., Likharev K.K. et al. Raschety na prochnost' v mashinostroyenii: v 3-kh t. Pod red. S.D. Ponomareva [Strength calculations in mechanical engineering: in 3 volumes / In Ponomarev S. D. (ed.)]. Moscow: Mashgiz Publ., 1959. Vol. 3. 1118 p.
17. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Opredeleniye peremeshcheniy v obolochечно-plastinchatom sedle klapana [Determination of displacements in shell-plate valve seat] // *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. Bratsk: BrSU Publ., 2013, No. 2(18), pp. 22–28.
18. Gerasimov S.V., Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Matematicheskaya model' dinamicheskogo nagruzheniya dvukhsedel'nogo klapana [Mathematical model of dynamic loading of a double-seat valve] // *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i inzhenernyye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences]. Bratsk: BrSU Publ., 2012, Vol. 1, pp. 126–129.
19. Gerasimov S.V., Dolotov A.M., Saakyan K.G. Raschet sedla uplotnitel'nogo soyedineniya, nagruzhenno go zatvorom i davleniyem germetiziruyemoy sredy [Calculation of the seat of the sealing connection, loaded with the valve and the pressure of the sealed medium] // *Mekhaniki XXI veku. XI Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem: sbornik dokladov* [Mechanics of the XXI century. XI All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation: collection of reports]. Bratsk: BrSU Publ., 2012, No. 11, pp. 106–111.
20. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Puti sovershenstvovaniya klapannykh uplotnitel'nykh soyedineniy s obolochечными sedlami [Ways to Improve Valve Seal Connections with Shell Seats] // *Yenergo ta resursozberigayuchi tekhnologii pri yekspluatatsii mashin ta ustatkuvannya: Materiali 4-oї mizhvuzivs'koї naukovo-tekhnichnoї konferentsii vkladachiv, molodikh vchenikh ta studentiv* [Energy and resource-saving technologies during the operation of machines and installation: Materials of the 4th multi-university science and technology conferences, young students and students]. Donetsk, 2012, pp. 87–88.
21. Belogolov Yu.I. Sovershenstvovaniye konstruksiy uplotnitel'nykh soyedineniy s tonkostennymi elementami (uprugoy kromkoy): avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of the designs of sealing joints with thin-walled elements (elastic edge): author. Ph.D. (Engineering) diss.]. Bratsk, 2013. 9 p.

Информация об авторах

Белоголов Юрий Игоревич – канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pr-mech@mail.ru.

Information about the authors

Yuriy I. Belogolov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor; Associate Professor of the Subdepartment of Operation Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: pr-mech@mail.ru.

Моделирование процесса отслоения краски и окисных загрязнений от металлических поверхностей при диэлектрическом нагреве с использованием конечно-элементной системы «Marc»

А. С. Попов✉, М. С. Попов, С. И. Попов

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

✉ popov_as@irgups.ru

Резюме

Рассматривается процесс отслоения покрытий металлических деталей при их очистке. Метод очистки основан на перепаде температур внутри детали (подложки) и покрытия, который приводит к возникновению температурных напряжений, в том числе за счет различий в теплофизических характеристиках покрытия и подложки. Описаны параметры внешнего электромагнитного поля и электрофизические характеристики материалов покрытий металлических поверхностей, влияющие на нагрев в электромагнитных полях ВЧ-диапазона. При оценке эффективности очистки металлических поверхностей значение имеют температура начала отслоения при заданной плотности теплового потока через поверхность и характер изменения теплового сопротивления материала, обусловленного его терморазрушением. Проведен инженерный анализ отслоения краски и окисных загрязнений с металлических поверхностей под воздействием электрического поля высокой частоты с использованием конечно-элементной системы Marc. Произведён расчёт теплового и напряжённо-деформированного состояния. Анализ проводится методом конечных элементов в термомеханической постановке. Рассматривается диэлектрический метод нагрева. Производится вычисление полей температур и напряжённо-деформированного состояния, с целью прогнозирования отслоения покрытия от металлической поверхности. Проведение расчётов поможет снизить число физических испытаний и будет способствовать экономии средств на разработку технологических процессов. Данные расчетов позволяют дать рекомендации по оптимизации параметров ВЧ очистки металлических поверхностей от краски и окисных загрязнений диэлектрическим методом на промышленном оборудовании. Результаты моделирования могут найти широкое применение при разработке технологических процессов очистки, металлических поверхностей от краски и окисных загрязнений в поле высокой частоты.

Ключевые слова

очистка металлических поверхностей, высокочастотное излучение, диэлектрический нагрев, Marc, инженерный анализ, тепло-прочностный анализ, технологический процесс

Для цитирования

Попов А. С. Моделирование процесса отслоения краски и окисных загрязнений от металлических поверхностей при диэлектрическом нагреве с использованием конечно-элементной системы «Marc» / А. С. Попов, М. С. Попов, С. И. Попов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 34–38. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).34-38

Информация о статье

поступила в редакцию: 11.05.2021, поступила после рецензирования: 02.08.2021, принята к публикации: 10.09.2021

Modeling the process of paint peeling off metal surfaces and oxide contamination under dielectric heating using the finite element system “Marc”

A. S. Popov✉, M. S. Popov, S. I. Popov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ popov_as@irgups.ru

Abstract

The process is considered of peeling off of coatings of metal parts during their cleaning. The cleaning method is based on the temperature difference inside the part (substrate) and the coating, resulting in temperature stresses, including those caused by differences in the thermal characteristics of the coating and the substrate. The parameters of the external electromagnetic field and electrophysical characteristics of metal surface coating materials that affect heating in the RF electromagnetic fields are described. When evaluating the cleaning efficiency of metal surfaces, the starting temperature of separation at a given density of heat flow through the surface and the nature of changes in the thermal resistance of the material due to its thermal destruction are important. An engineering analysis of paint and oxide contamination peeling off metal surfaces under the influence of a high-frequency electric field using the finite element system Marc was performed. The calculation of the thermal and stress-strain state is made. Calculations will help to reduce the number of physical tests and save money for the development of technological processes. The analysis is performed by the finite element method in a thermo-mechanical formulation. The dielectric heating meth-

od is considered. The calculation of temperature and stress-strain state fields is performed in order to predict the separation of the coating from the metal surface. The obtained simulation results can be widely used in the development of technological processes for cleaning metal surfaces and parts from paint and oxide contamination in the high frequency electric field.

Keywords

cleaning of metal surfaces, high-frequency radiation, dielectric heating, Marc, engineering analysis, heat and strength analysis, technological process

For citation

Popov A. S., Popov M. S., Popov S. I. Modelirovanie processa otsloeniya kraski i okisny`x zagryaznenij ot metallicheskich pov-erxnostej pri die`lektricheskom nagreve s ispol`zovaniem konechno-e`lementnoj sistemy` "Marc" [Modeling the process of paint peeling off metal surfaces and oxide contamination under dielectric heating using the finite element system "Marc"]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 34–38. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).34-38

Article info

Received: 11.05.2021, Revised: 02.08.2021, Accepted: 10.09.2021

Введение

Метод диэлектрического нагрева является перспективным методом очистки от краски и окисных загрязнений металлических поверхностей. Одним из способов его осуществления – отслоение краски с металлических поверхностей под воздействием электрического поля высокой частоты (ВЧ). Метод основан на возникновении перепада температур внутри покрытия и металлической поверхности и температурных напряжений в результате различия теплофизических характеристик покрытия и поверхности. Управление технологическим процессом очистки производится регулированием мощности, выделяемой в материале покрытия очищаемой заготовки. Количество тепла, выделяемого в материале покрытия, зависит от частоты тока, напряженности электрического поля и свойств материала. Количество мощности, которая выделяется в покрытии можно определить по формуле:

$$P = 2\pi f E^2 \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta, \quad (1)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала; ε_0 – электрическая постоянная вакуума; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла поглощения; f – частота тока; E – напряженность электрического поля.

Мощность, необходимую для нагрева материала до заданной температуры, можно выразить следующим уравнением:

$$P = C_p \rho \frac{T_1 - T_2}{\tau}, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала; C_p – удельная теплоемкость; T_1 – температура материала после нагрева; T_2 – начальная температура материала; τ – время нагрева.

Приравнивая правые части выражения (1) и (2), найдем время нагрева:

$$\tau = C_p \rho \frac{C_p \rho (T_1 - T_2)}{2\pi f E^2 \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta \xi_m},$$

где ξ_m – термический коэффициент.

Исходя из приведенных зависимостей, для управления процессом разогрева удаляемой поверхности необходимо регулировать напряженность электрического поля E , частоту тока f , а также время воздействия ВЧ излучения τ . Максимальный предел напряженности поля определяется электрической прочностью материала, т. е. напряженностью поля, приводящей к пробое или разрушению диэлектрика. Рабочая частота определяется технической характеристикой генератора. В промышленности используются установки с частотой 40–80 МГц. При этом произведение $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ называют фактором диэлектрических потерь. У неполярных материалов этот фактор имеет достаточно низкое значение, поэтому неполярные материалы высокочастотным методом почти никогда не нагреваются. Полярные материалы очень быстро нагреваются в поле ВЧ, вследствие того, что фактор диэлектрических потерь имеет достаточно большое значение. Чем больше это значение у материала, тем выше его полярность, и тем лучше он поддается нагреву в ВЧ-поле. Ориентировочные значения $\operatorname{tg} \delta$ для оценки разогрева диэлектрическим методом: материалы с $\operatorname{tg} \delta$ до 0,1 очень хорошо нагреваются; $\operatorname{tg} \delta$ до 0,01 нагреваются; $\operatorname{tg} \delta$ ниже 0,01 не нагреваются. При нагреве материалов тепло частично выделяется также за счет наличия полярных примесей в материале покрытия. Если в удаляемом покрытии содержатся свободные ионы, то в электрическом поле ВЧ появляются ионы проводимости, следовательно, выделяется тепло. Однако основной эффект вносит движение полярных диполей. При оценке эффективности и отладки температурно-скоростного режима очистки металлических поверхностей значение имеет температура начала отслоения при заданной мощности теплового потока через поверхность и характер изменения теплового сопротивления материала, обусловленного его терморазрушением [1–11]. Данная задача решается путем моделирования и проведения инженерного анализа процесса отслоения покрытий ме-

таллических поверхностей с использованием конечно-элементной системы «Magc» [12–17].

Описание параметров модели

В работе решение строится в плоской постановке. Рассматривается область AECF, представляющая собой покрытие ABCD (рис. 1), нанесенное на металлическую подложку BEDF. Покрытие на участке GHIJ (рис. 2) разогревается под действием ВЧ-поля. Материалом покрытия служит полиэстер, подложка выполнена из стали. Сетка конечных элементов состоит из 840 элементов и 3 783 узлов. Физико-механические характеристики материалов: для полиэстера – коэффициент температурного расширения $\alpha = 60\text{--}125 \cdot 10^{-6}$, модуль упругости $E = 2\,900\text{--}3\,800$ МПа; для стали – коэффициент Пуассона $\nu =$

$0,25$, модуль упругости $E = 200\,000$ МПа, коэффициент температурного расширения $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6}$.

Моделирование термо-напряженно-деформированного состояния

Решается задача моделирования переходного теплового процесса, во временной области (рис. 2).

Выделение тепловой мощности в покрытии происходит при воздействии на него электромагнитного поля ВЧ. Решатель «Magc» автоматически рассчитывает тепловые потоки, возникающие в заготовке. Если в начале процесса нагрева напряжения в покрытии отсутствуют, то по мере нагрева напряжения возрастают. Из-за значительной разности значений модуля упругости покрытия $E = 2\,900\text{--}3\,800$ МПа и материала подложки $E = 200\,000$ МПа,

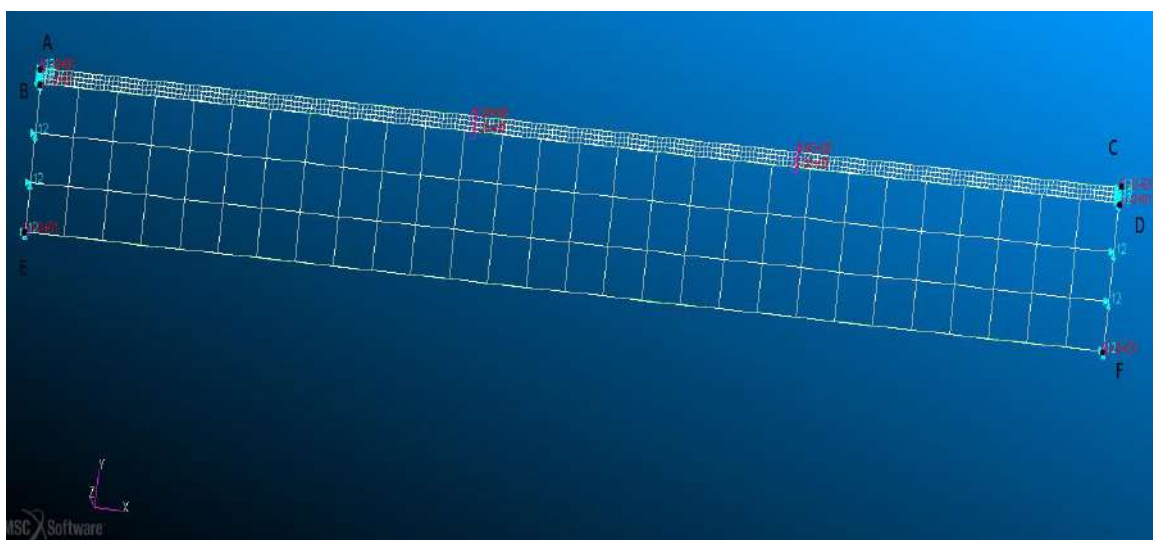


Рис. 1. Расчетная схема заготовки в исходном состоянии

Fig. 1. Calculated scheme of a billet in the initial state

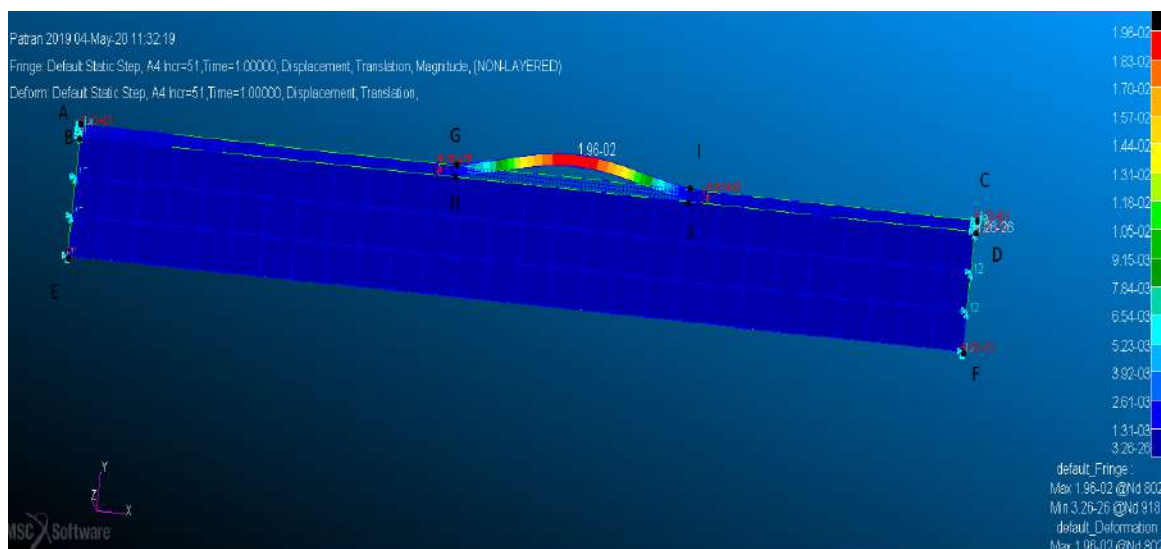


Рис. 2. Расчетная схема заготовки в процессе моделирования нагрева очищаемой поверхности

Fig. 2. Calculated scheme of a billet in the process of simulating the heating of the surface being cleaned

а также разницы толщин, возникающие напряжения приводят к деформации и отслоению покрытия. В стальной подложке напряжения от давления покрытия весьма незначительны и не вызывают ее существенной деформации. В целом система «Марс» решает тепловую задачу в полной постановке, имеется возможность добавить другие виды теплопередачи, например, конвекцию, излучение, выделение тепла от трения и пластических деформаций. В данной задаче этими факторами решено пренебречь.

Заключение

Описан комплексный подход к моделированию отслоения покрытий металлических деталей при их очистки ВЧ методом с использованием системы «Марс». Приведены основные исходные дан-

ные, требуемые для расчета, описана расчетная схема и основные допущения при моделировании, возможности получения результатов. Определено напряженно-деформированное состояние заготовки. Описание методики расчета ВЧ очистки позволяет оценить ее применимость к решению производственных задач. Проведение расчетов помогает снизить число физических испытаний и способствует экономии средств на разработку технологических процессов. Полученные данные позволяют дать рекомендации по оптимизации параметров ВЧ очистки металлических поверхностей от краски и окисных загрязнений диэлектрическим методом на промышленном оборудовании.

Список литературы

1. Пат. 194234 Рос. Федерация. Установка для нанесения полимерных порошковых покрытий. Попов М.С., Попов А.С., Лившиц А.В. и др. № 2019118169 ; заявл. 11.06.2019 ; опублик. 03.12.2019. Бюл. № 34.
2. Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and prospects of increasing their service life / D.V. Butorin, N.G. Filippenko, A.V. Livshits et al. // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. С. 012010. DOI:10.1088/1757-899X/760/1/012010.
3. Высокочастотная электротермия : справочник / под редакцией А.В. Донского М. : Машиностроение, 1965. 156 с.
4. Лившиц А.В. Управление технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 3. С. 120–126.
5. Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Каргапольцев С.К. Высокочастотная обработка полимерных материалов. Организация систем управления. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2013. 172 с.
6. Филиппенко Н.Г. Автоматизация управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов : дис. ... канд. тех. наук. Иркутск, 2012. 158 с.
7. Ларченко А.Г. Система автоматизированного управления высокочастотным диагностированием изделий из полимерных материалов // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 8. С. 3–8.
8. Экспериментальные исследования возможности восстановления изделий из полимерных материалов / С.И. Попов, А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск, 2013. С. 430–437.
9. Коляно Ю.М., Кулик А.Н. Температурные напряжения от объемных источников. Киев : Наукова думка, 1983. 288 с.
10. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М. : Наука, 1966. 636 с.
11. Попов С.И. Автоматизация управления технологическими процессами восстановления эксплуатационных свойств полимеров : дис. ... кан. тех. наук. Иркутск, 2013. 150 с.
12. Ларченко А.Г., Филиппенко Н.Г. Высокочастотное диагностирование машиностроительных изделий из полимерных материалов // Технология машиностроения. 2020. № 11. С. 55–63.
13. Александров А.А. Моделирование остаточных напряжений при закалке алюминиевых сплавов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск, 2017. Т. 1. С. 391–396.
14. Ларченко А.Г. Оценка качества изделий из полимерных материалов машиностроительного назначения // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2019. Т. 23. № 3 (146). С. 463–471.
15. Буторин Д.В. Автоматизация управления процессами высокочастотной обработки полимерных материалов разной степени полярности : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2018.
16. Баканин Д.В. Автоматизация электромагнитной модификации полимеров воздействием импульсного ВЧ-поля // XIV Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых : материалы Всерос. науч. конф. Вологда, 2020. С. 175–178.
17. Alexandrov A.A. Modeling of non-uniform distribution of thermal residual stresses // VI International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway : conference proceedings. China ; Irkutsk, 2018. С. 464–466.

References

1. Popov M.S., Popov A.S., Livshits A.V., Popov S.I. *Ustanovka dlya naneseniya polimernykh poroshkovykh pokrytiy [Installation for applying polymer powder coatings]* // Utility model patent: No.194234, State register of utility models. Patent application for utility model No. 2019118169 dated June 11, 2019. Publ.: December 03, 2019. Bull. No. 34.
2. Butorin D.V., Filippenko N.G., Livshits A.V., Popov S.I. Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and prospects of increasing their service life. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, P. 012010.
3. *Vysokochastotnaya elektrotermiya : spravochnik. Pod redaktsiyey A.V. Donskogo [High-frequency electrothermia: reference book. In Donskoy A.V. (ed.)]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1965. 156 p.*
4. Livshits A.V. *Upravlenie tekhnologicheskimi processami vysokochastotnoy elektrotermii polimerov [Management of technological processes of high-frequency electrothermia of polymers]. Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii [Mechanical engineering and automation problems]*, 2015, No. 3, pp. 120–126.

5. Livshits A.V., Filippenko N.G., Kargapol'tsev S.K. Vysokochastotnaya obrabotka polimernykh materialov. Organizatsiya sistem upravleniya [High-frequency processing of polymeric materials. Organization of management systems]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2013. 172 p.
6. Filippenko N.G. Avtomatizatsiya upravleniya processom vysokochastotnoj obrabotki polimernykh materialov: dis. ... kand. tekhn. nauk [Automation of control over the process of high-frequency processing of polymeric materials: Ph.D. (Engineering) diss.]. Irkutsk, 2012. 158 p.
7. Larchenko A.G. Sistema avtomatizirovannogo upravleniya vysokochastotnym diagnostirovaniyem izdeliy iz polimernykh materialov [Automated control system for high-frequency diagnostics of products made of polymer materials]. *Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii* [Automation. Modern technologies], 2015, No. 8, pp. 3–8.
8. Popov S.I., Livshits A.V., Filippenko N.G. Eksperimental'nyye issledovaniya vozmozhnosti vosstanovleniya izdeliy iz polimernykh materialov [Experimental studies of the possibility of restoring products made of polymer materials]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2013, pp. 430–437.
9. Kolyano Yu.M., Kulik A.N. Temperaturnyye napryazheniya ot ob'yemnykh istochnikov [Temperature stresses from volumetric sources]. Kiev: Naukova dumka, 1983. 288 p.
10. Timoshenko S.P., Voinovsky-Krieger S. Plastinki i obolochki [Plates and shells]. Moscow: Nauka Publ., 1966. 636 p.
11. Popov S.I. Avtomatizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami vosstanovleniya ekspluatatsionnykh svoystv polimerov: dis. ... kan. tekhn. nauk [Automation of control of technological processes of restoration of operational properties of polymers: Ph.D. (Engineering) diss.]. Irkutsk: 2013. 150 p.
12. Larchenko A.G., Filippenko N.G. Vysokochastotnoye diagnostirovaniye mashinostroitel'nykh izdeliy iz polimernykh materialov [High-frequency diagnostics of machine-building products made of polymer materials]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya* [Technology of mechanical engineering], 2020, No. 11, pp. 55–63.
13. Alexandrov A.A. Modelirovaniye ostatochnykh napryazheniy pri zakalke alyuminiyevykh splavov [Modeling of residual stresses during hardening of aluminum alloys]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2017, Vol. 1, pp. 391–396.
14. Larchenko A.G. Otsenka kachestva izdeliy iz polimernykh materialov mashinostroitel'nogo naznacheniya [Quality assessment of products made of polymer materials for machine-building purposes]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2019, Vol. 23, No. 3(146), pp. 463–471.
15. Butorin D.V. Avtomatizatsiya upravleniya protsessami vysokochastotnoy obrabotki polimernykh materialov raznoy stepeni polyarnosti: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Automation of control of processes of high-frequency processing of polymer materials of different degrees of polarity: author. Ph.D. (Engineering) diss.]. Krasnoyarsk, 2018. 174 p.
16. Bakanin D.V. Avtomatizatsiya elektromagnitnoy modifikatsii polimerov vozdeystviyem impul'snogo VCH-polya [Automation of electromagnetic modification of polymers by the action of a pulsed RF field]. *XIV Yezhegodaya nauchnaya sessiya aspirantov i molodykh uchenykh: materialy Vseros. nauch. konf.* [The XIV Annual scientific session of graduate students and young scientists. Materials of the All-Russian Scientific Conference: in 3 vols.]. Vologda, 2020, pp. 175–178.
17. Alexandrov A.A. Modeling of non-uniform distribution of thermal residual stresses. *VI International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway. conference proceedings*, 2018, pp. 464–466.

Информация об авторах

Попов Александр Сергеевич – аспирант кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: popov_as@irgups.ru

Попов Максим Сергеевич – аспирант кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: popov_as@irgups.ru

Попов Сергей Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: popov_si@irgups.ru

Authors

Alexander S. Popov – graduate student of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail popov_as@irgups.ru

Maksim S. Popov – graduate student of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail popov_as@irgups.ru

Sergey I. Popov – Ph.D. in Engineering Science, Associate professor of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: popov_si@irgups.ru

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

ТРАНСПОРТ

TRANSPORT

Анализ влияния обратного тягового тока на работу рельсовых цепей

П. С. Пинчуков✉, С. И. Макашева

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ pinchukov-pavel@mail.ru

Резюме

Статья посвящена актуальной проблеме повышения устойчивости функционирования рельсовых цепей железных дорог переменного тока. Установлено, что при регулярном движении тяжеловесных поездов повышение потенциала «рельс – земля» служит не только причиной сбоев в работе рельсовых цепей, но и вызывает различные нарушения в работе всех профильных служб железной дороги, участвующих в организации движения поездов. Для исследования работы рельсовых цепей была разработана имитационная модель электрифицированной железной дороги переменного тока в среде Matlab на примере участка Завитая – Короли Забайкальской железной дороги. Проведена оценка степени влияния параметров путевых дроссель-трансформаторов и переходного сопротивления балластного слоя на величину потенциалов «рельс – земля». В имитационную модель были заложены параметры системы тягового электроснабжения участка и реального графика движения поездов при условии нахождения на четном пути максимально возможного количества поездов повышенной массы. На основании исполненных в программном комплексе «Кортэс» тяговых расчетов определены токи поездов, величины обратного тягового тока и токов по участкам электрической цепи межподстанционной зоны. Проведенное имитационное моделирование показало, что на распределение по длине пути потенциала «рельс – земля» существенное влияние оказывает активное сопротивление путевых дроссель-трансформаторов. При этом под воздействием значительных по величине тяговых токов тяжеловесных поездов при неизменном сопротивлении балластного слоя происходит формирование потенциалов «рельс – земля», превышающих по своей величине пробивное напряжение искровых промежутков опор контактной сети. Выявлено, что рост потенциала в значительной степени связан с повышением активного сопротивления путевых дроссель-трансформаторов. Отмечено, что в условиях эксплуатации изменение состояния балластного слоя при его увлажнении и промерзании также приводит к появлению потенциалов, превышающих пробивное напряжение искровых промежутков, что является существенным ограничением для дальнейшего наращивания масс поездов и интенсивности движения по железнодорожным участкам Сибири и Дальнего Востока.

Ключевые слова

система тягового электроснабжения, рельсовая цепь, путевой дроссель-трансформатор, обратный тяговый ток, потенциал «рельс – земля»

Для цитирования

Пинчуков П.С. Анализ влияния обратного тягового тока на работу рельсовых цепей / П. С. Пинчуков, С. И. Макашева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 40–49. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).00-

Информация о статье

поступила в редакцию: 30.08.2021, поступила после рецензирования: 07.09.2021, принята к публикации: 17.09.2021

Analysis of the reverse traction current influence on the track circuits operation

P. S. Pinchukov✉, S. I. Makasheva

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ pinchukov-pavel@mail.ru

Abstract

The paper deals with the urgent problem of increasing the stability of the functioning of the AC railways electric track circuits. It was found that under the regular heavy haul traffic the "rail-ground" potential increase not only results in failures of the rail circuits operation, but also leads to various breaches in the work of all railway departments involved in the organization of train traffic. A simulation model of an AC electrified section on the example of the Zabaikalskaya railway has been developed based on MATLAB software platform. Influence of track impedance bond parameters and the ballast transient resistance on the rail potential value was estimated. The simulation model included the power supply system parameters for the section considered and the real train schedule, provided that the maximum possible number of heavy trains is on the track. Based on the traction calculations performed in the KORTES software the train currents, the reverse traction current and currents in the track sections of inter substation zone are calculated. A research of track impedance bond parameters influence on the rail potentials (RPs) has been carried out. The simulation modeling showed that the distribution of the "rail-ground" potential along the length of the substation

zone is significantly influenced by the active resistance of the track throttle transformer impedance bond. At the same time, with the constant value of the ballast resistance, a change in the resistance of the track impedance bond due to humidification and freezing under the influence of large traction currents causes the appearance of potentials exceeding the disruptive voltage of the spark gaps. It was revealed that the rail potential growth is largely associated with the track impedance bond's active resistance increase. It is noted that humidification and freezing of the ballast layer also leads to the appearance of potentials exceeding the breakdown voltage of spark gaps, which is a significant limitation for the further increase of train weight and traffic intensity for the Siberian and the Far Eastern railways.

Keywords

power supply system, track circuit, track impedance bond, traction return current, rail potential

For citation

Pinchukov P. S., Makasheva S. I. Analiz vliyaniya obratnogo tyagovogo toka na rabotu rel'sovyh cepej [Analysis of the reverse traction current influence on the track circuits operation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 3 (71), pp. 40–49. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).40-49

Article info

Received: 30.08.2021, Revised: 07.09.2021, Accepted: 17.09.2021

Введение

На российский железнодорожный транспорт по данным за 2019 г. приходится 46 % всего грузооборота страны. Без учета трубопроводного транспорта, который в большей степени ориентирован на экспорт, доля железнодорожного транспорта России составляет уже 87 %, или порядка 1 млрд т в год [1]. Растущие показатели грузооборота на железной дороге в настоящее время достигаются повышением весовых норм, длин поездов и интенсивности их движения, что приводит к значительному росту тяговых токов.

Протекание по элементам системы тягового электроснабжения и рельсовым цепям (РЦ) величин токов, значительно превосходящих проектные значения, затрудняет работу элементов тяговых подстанций, контактной сети, устройств релейной защиты и автоматики, устройств сигнализации, централизации и блокировки [2–7].

Актуальность проблемы и постановка задачи

Ходовые рельсы в системе тягового электроснабжения используются в качестве обратного проводника для возврата (канализации) тяговых токов на питающие тяговые подстанции. Преимуществом такого технического решения является отсутствие дополнительных проводников для канализации тока и возможность заземления токопроводящих конструкций на рельс для обеспечения условий электробезопасности, а недостатками – проблемы с возникающими нежелательными потенциалами рельса относительно земли по длине межподстанционной зоны и паразитными токами утечки через переходное сопротивление «рельс – земля» [6–8].

Значительные тяговые нагрузки при тяжеловесном движении становятся причиной появления повышенных потенциалов «рельс – земля» по длине пути, что затрудняет функционирование устройств, относящихся к службе путевого хозяйства (ПЧ), а также нарушает требования электробезопасности [5, 6, 8].

При росте потенциалов «рельс – земля» ухудшаются условия функционирования заземленного на рельс оборудования службы электрификации и электроснабжения (ЭЧ), учащаются проблемы, связанные с работой устройств заземления опор контактной сети и других заземленных устройств [2, 3, 5, 6, 8]. Так, повышение потенциалов «рельс – земля» по длине пути особенно негативно проявляется вблизи опор контактной сети (КС), имеющих в цепи заземления искровые промежутки (ИП) и газоразрядные приборы защиты (ГРПЗ). При тяжеловесном движении в нормальном режиме работы значения формирующихся потенциалов «рельс – земля» могут превысить номинальные значения напряжения срабатывания для ИП и ГРПЗ и вызвать их пробой. В этом случае опора КС «разземляется», и при возникновении короткого замыкания на ней релейная защита фидера контактной сети (ФКС) может не сработать. Такая ситуация для ЭЧ крайне нежелательна, так как вынужденный перерыв в электроснабжении приводит к срыву графика движения поездов [5, 6, 10, 11].

Пробой приводит к опасной утечке тока с рельсов через арматуру и бетон опоры и переходное сопротивление «рельс – земля», что вызывает асимметрию тягового тока и образует ряд проблем в работе устройств, относящихся и к другим службам железной дороги.

РЦ используют в качестве проводника рельсовых нитей железнодорожного пути, они являются частью систем автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) и авторегулировки для контроля состояний занятости участков пути и целостности рельсовой линии [9–11]. Возникновение при тяжеловесном движении сверхнормативной асимметрии обратного тягового тока негативно сказывается на работе устройств АЛС, затрудняя передачу кодовых сигналов на борт локомотива и усложняя работу локомотивной службы (ТЧ) [7].

Для канализации обратного тягового тока в обход изолирующих стыков рельсовой линии применяются дроссель-трансформаторы (ДТ), которые имеют различные конструкции и номинальные мощности в зависимости от величин протекающих обратных тяговых токов [7–11]. К вторичной сигнальной обмотке ДТ подключается аппаратура РЦ, относящаяся к службе сигнализации, централизации и блокировки (ШЧ) [6–12].

Неустойчивая работа аппаратуры РЦ может приводить к ложной смене показаний напольных светофоров, в результате чего поезд будет ложно замедлять ход, вызывая снижение пропускной способности участков железных дорог [12–14].

Перекрытие же показаний путевого светофора перед движущимся поездом приводит к автостопному торможению, вызывающему дискомфорт у пассажиров (что чревато травмами различной тяжести от испуга, падения и т. п.). В грузовом движении резкие торможение и остановка поезда могут вызывать дефекты на колесах («ползуны»), а в ряде случаев при неудачном формировании поезда вероятны случаи выдавливания легких вагонов из состава поезда [12–14].

Таким образом, устойчивость функционирования электрических рельсовых цепей касается как минимум четырех служб железной дороги и необходима для обеспечения безопасности, бесперебойности и надежности перевозочного процесса. Задачей проводимого исследования является оценка степени влияния обратного тягового тока на параметры элементов рельсовых цепей для поиска решений по уменьшению числа отказов РЦ.

Поскольку наиболее острые проблемы в работе службы электрификации и электроснабжения, вызванные протеканием обратного тягового тока по

РЦ сопряжены с работой ИП и ГРПЗ, объектом исследования становится РЦ, содержащая ДТ, а предметом исследования – формирование потенциала по длине межподстанционной зоны с учетом тяжеловесного движения.

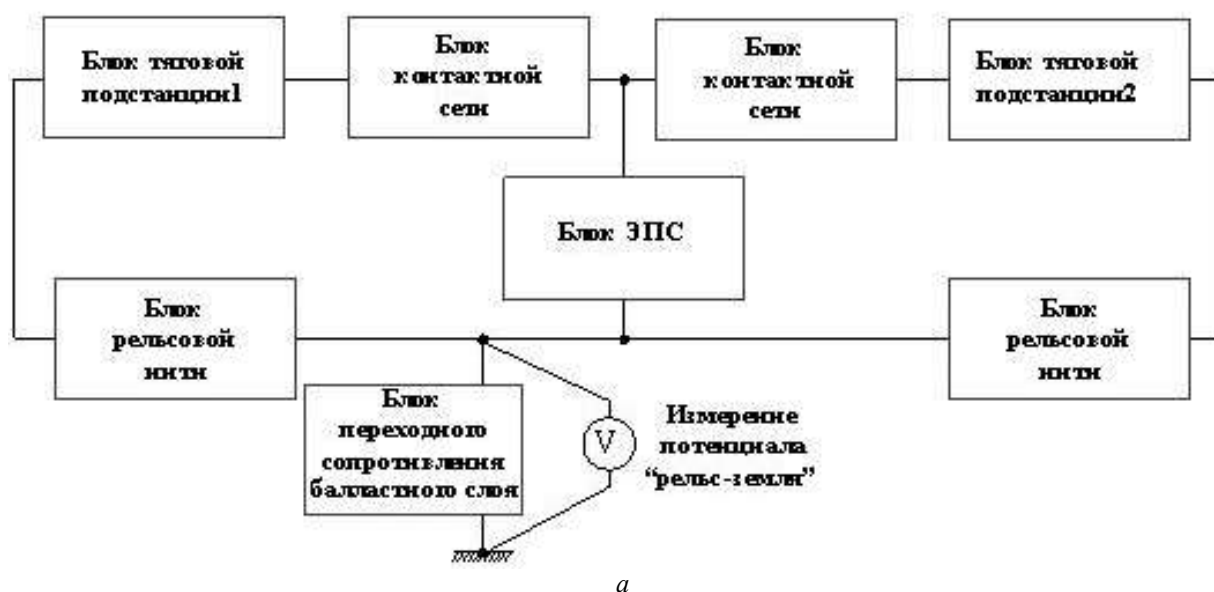
Применяемые методы исследования и этапы построения имитационной модели

Работу РЦ на участках электрической тяги переменного тока характеризуют быстроизменяющиеся в широком диапазоне и резкопеременные параметры, оценку которых целесообразнее всего вести с применением имитационного моделирования на основе современных программных комплексов, к примеру, при помощи системы компьютерной математики Matlab, включающей расширение Simulink.

На примере участка Короли – Завитая Забайкальской железной дороги была разработана модель двухпутного участка тягового электроснабжения протяженностью 51,1 км, напряжением 25 кВ, 50 Гц с кодовыми РЦ, работающими на сигнальной частоте 25 Гц.

При выборе параметров схем замещения для реализации элементов имитационной модели были приняты допущения [10–12, 15–17]. Упрощенная структурная схема имитационной модели, состоящая из модульных блоков элементов системы тягового электроснабжения сети и РЦ, а также схема расположения электроподвижных составов (ЭПС) приведены (рис. 1).

Дополнительный учет тяговых токов электровазов дает более широкие возможности при моделировании распределения обратных тяговых токов в рельсах и потенциалов «рельс – земля» [15], поэтому важным было моделирование поездной



а

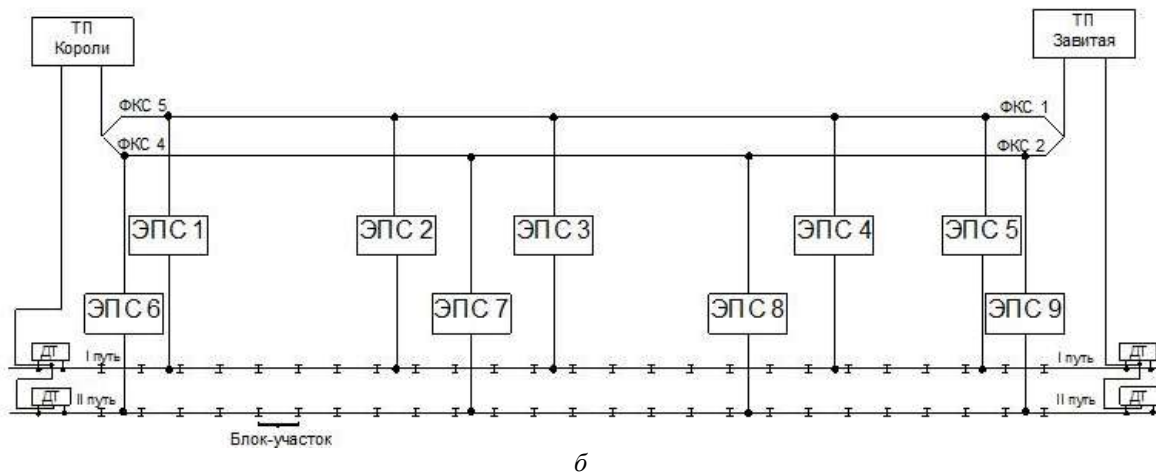


Рис. 1. Этапы построения имитационной модели участка железной дороги переменного тока:
 а – упрощенная структурная схема модели; б – моделирование поездной ситуации

Fig. 1. Stages of creating a simulation model of an AC railway section:
 a – a simplified structural model scheme; b – train situation simulation

ситуации, максимально приближенной к реальным условиям эксплуатации.

Для задания нагрузок необходимо было выбрать расчетный график движения поездов (ГДП), задать местоположение и величину тяговых нагрузок. Для этого из автоматизированной системы ведения и анализа графика исполненного движения ГИД «Урал-ВНИИЖТ» [18] в работу был взят реальный график движения поездов (рис. 2).



Рис. 2. Фото расчетного графика движения поездов

Fig. 2. Photo of the train's schedule

Для рассмотрения была взята тяжелая поездная ситуация на межподстанционной зоне Короли – Завитая Забайкальской железной дороги, где одновременно находится девять поездов:

– пять поездов на нечетном пути (обозначены номерами 1–5) (см. рис. 1, б), ЭПС получают питание от пятого фидера контактной сети (ФКС 5);

– четыре поезда на четном пути (обозначены номерами 6–9) (см. рис. 1, б), ЭПС получают питание от ФКС 4.

При моделировании РЦ была разбита на отдельные блок-участки длиной 1–2,5 км каждый.

Марка контактной подвески ПБСМ-95+МФ-100, марка рельса – Р65. На рассматриваемом участке эксплуатируются ДТ-1-300. В имитационной модели для опор контактной сети предусмотрено наличие ИП-3 при присоединении к рельсу.

Зная местоположения и массы поездов на рассматриваемом участке, а также типы ЭПС и параметры схемы тягового электроснабжения, далее были проведены расчеты в программном комплексе «Кортэс» и определены тяговые токи, потребляемые ЭПС в схеме (см. рис. 1, а).

Рассчитанные значения тяговых токов были занесены в разработанную имитационную модель.

Фрагмент итоговой имитационной модели участка Завитая – Короли Забайкальской железной дороги представлен на (рис. 3), блок моделирования нагрузки ЭПС – на (рис. 4).

Для измерения потенциала «рельс – земля» и дальнейшего формирования потенциальных диаграмм по длине межподстанционной зоны по каждому из путей были намечены для измерений выходных характеристик 25 контрольных точек, равномерно разбивающих межподстанционную зону. В каждой такой точке соответствующего пути установлены измерительные приборы (амперметры и вольтметры) (рис. 5).

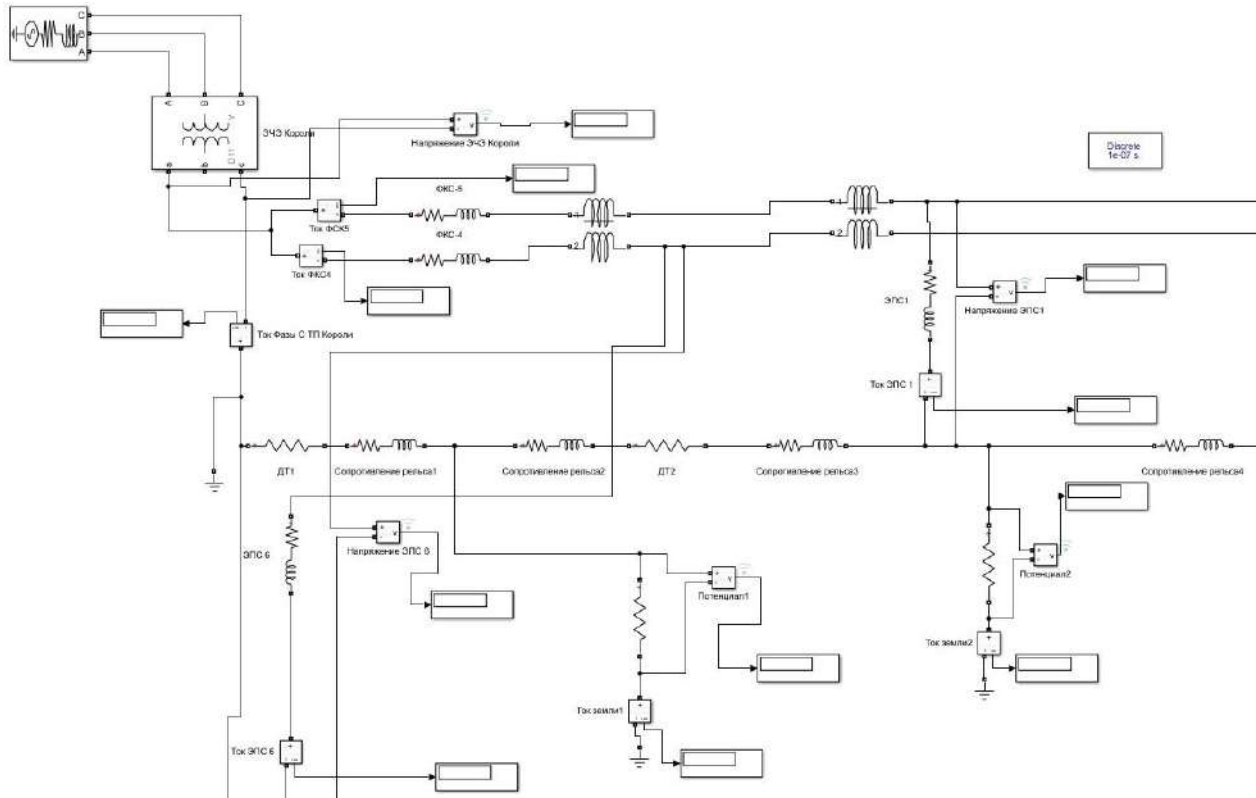


Рис. 3. Фрагмент имитационной модели участка тяговой сети с рельсовыми цепями
 Fig. 3. Fragment of a simulation model of the traction network's section with a track circuit

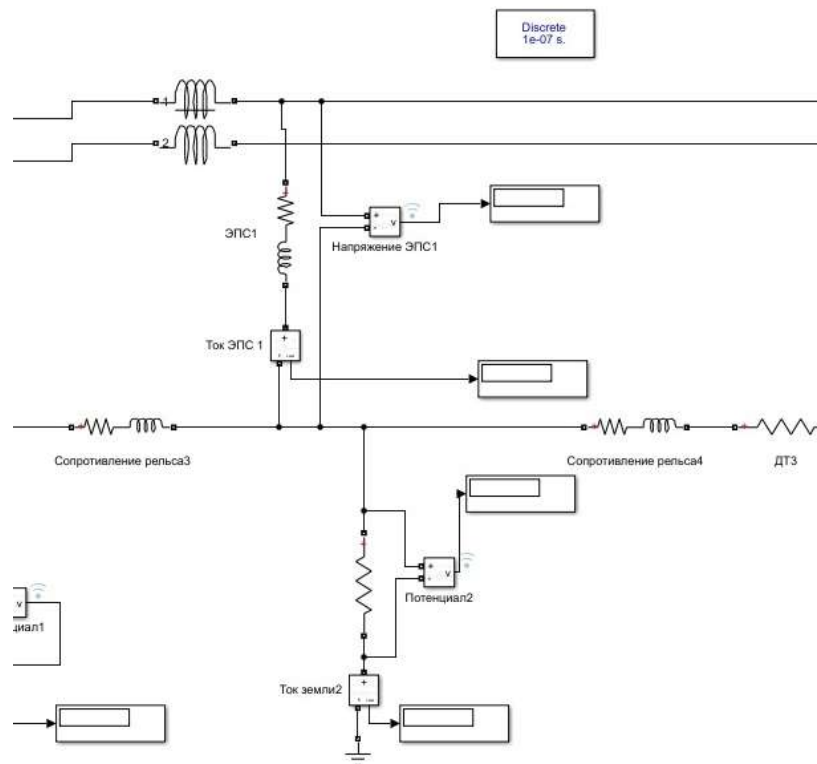


Рис. 4. Фрагмент имитационной модели блока нагрузки электроподвижного состава
 Fig. 4. Fragment of a simulation model of the electric locomotive

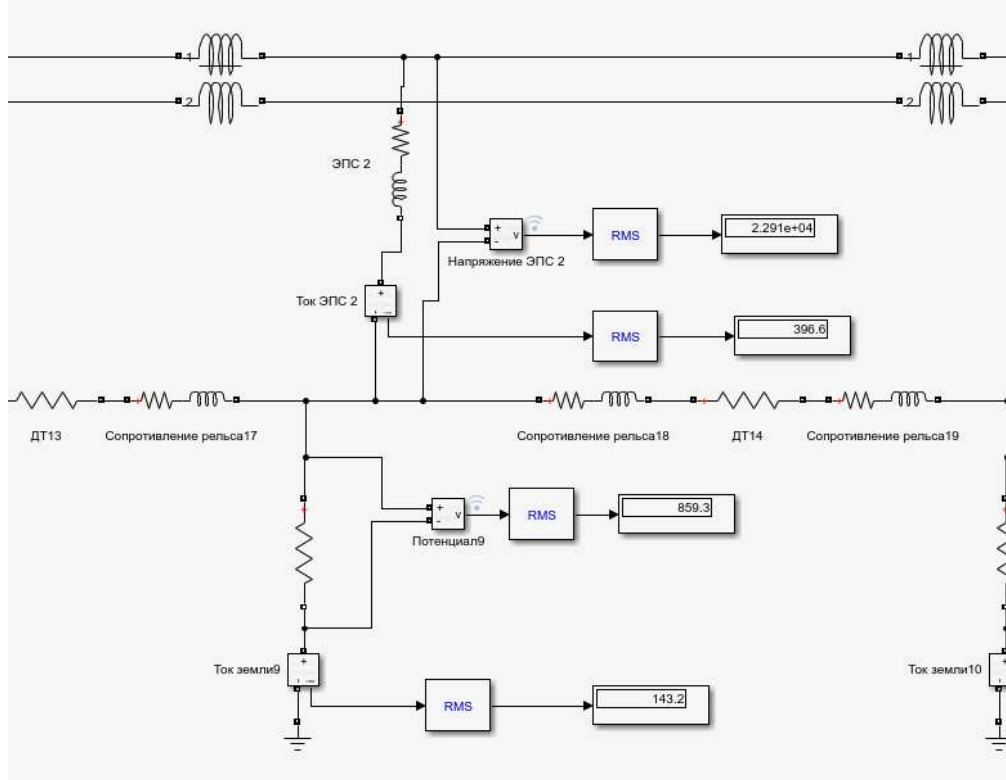


Рис. 5. Фрагмент имитационной модели в процессе расчета и измерения потенциала
Fig. 5. Fragment of a simulation model in the process of calculating and measuring the potential

Далее была проведена серия расчетов при неизменных местоположениях и величинах тяговых нагрузок для заданного ГДП, но с поочередными изменениями следующих параметров: активное сопротивление ДТ $R_{ДТ}$, Ом; переходное сопротивление балластного слоя $R_{бал}$, Ом·км.

Зафиксированные в каждой из намеченных точек результаты измерений послужили исходной информацией для построения расчетных потенциальных диаграмм по длине пути межподстанционной зоны Завитая – Короли.

Результаты и обсуждение

Важность роли ДТ в снижении асимметрии в РЦ за счет изменения и улучшения их конструкции

в последнее время подчеркивается отечественными и зарубежными исследователями [7, 8, 16, 17, 19], поэтому влияние ДТ на изменение потенциальных диаграмм по длине пути в проводимом исследовании рассмотрено более детально. Далее приведены потенциальные диаграммы для первого и второго путей, полученные по результатам измерений потенциалов в расчетных точках имитационной модели при различных активных сопротивлениях ДТ, $R_{ДТ} = 0 - 10$ Ом (рис. 6).

Пики потенциальных диаграмм, изображенных на (рис. 6), соответствуют местам нахождения ЭПС на участке. Кроме того, ранее проведенные исследования [5, 6, 10, 11] доказали, что на величину потенциала рельса значительное влияние оказы-

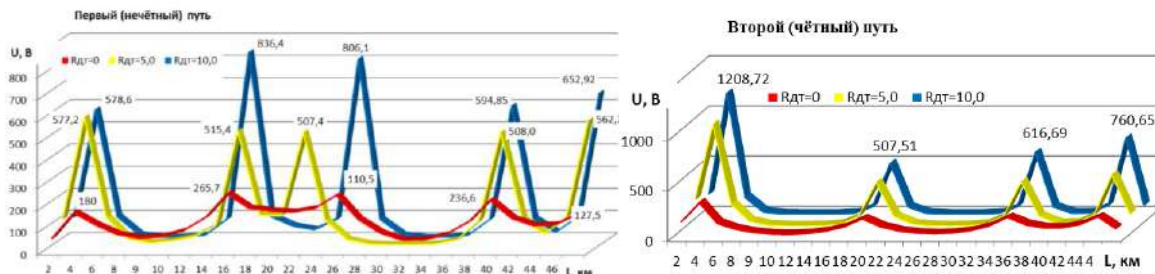


Рис. 6. Зависимости потенциала «рельс-земля» от длины пути для четного и нечётного путей участка Завитая-Короли при мокром балласте ($R_{бал}=1$ Ом·км)

Fig. 6. The function of the rail potentials on the length for first and second way of the Zavitaya-Koroly zone with wet ballast ($R_{бал}=1$ Om km)

вает переходное сопротивление «рельс – земля», зависящее от состояния балластного слоя (балласт сухой, мокрый или промерзший). Переходное сопротивление «рельс – земля» может принимать следующие значения (Ом·км):

- при мокром балласте – 1;
- при влажном балласте – 2;
- при сухом, слабо промерзшем балласте – 50;
- при сильно промерзшем балласте – 50–100 [20].

Используемые в расчетах сопротивления балласта соответствуют слабому загрязнению поверхности балластного слоя и старым деревянным шпалам. Опыт эксплуатации на рассматриваемом участке подтверждает, что подавляющее большинство отказов РЦ происходит в период, когда балластный слой увлажнен или мокрый.

На участке Короли – Завитая большинство ДТ марки 2ДТ-1-300. В случае одинаковых (близких по величине) значений тягового тока магнитные поля обмоток ДТ компенсируют друг друга, стремясь к нулю. Однако под действием разности токов ДТ будет перегреваться, и активное сопротивление обмоток при протекании обратного тягового тока будет расти.

Дроссель-трансформаторы марки 2ДТ-1-300 рассчитаны на пропускание номинального переменного тока 300 А в электротяге через каждую секцию основной обмотки. Средний вывод обмотки расчи-

тан на ток 600 А. При повышении обратного тягового тока в РЦ растет и абсолютное значение его асимметрии в секциях основных обмоток ДТ, в результате чего увеличивается насыщение сердечников ДТ. В этом случае магнитопровод теряет свойства индуктивного элемента, т. е. согласно [15] сопротивление такого устройства стремится к чисто активному.

Исходя из полученных данных, можно заключить, что при незначительной величине сопротивления мокрого балласта $R_{бал} = 1$ Ом·км и нормальной работе ДТ с сопротивлением ниже 5 Ом, формируемые по длине пути потенциалы «рельс – земля» не вызывают пробой искровых промежутков, так как расчетные значения формируемых потенциалов оказываются ниже, чем пробивное напряжение ИП, равное 800–1 200 В.

Однако, при превышении сопротивления ДТ величины 5 Ом значительно возрастают значения потенциалов «рельс – земля» на исследуемом участке, приближаясь к критическим величинам напряжения пробоя искровых промежутков. Особенно явно эта картина проявляется для второго (четного) пути грузового направления (см. рис. 6). Так, при $R_{ДТ} = 10$ Ом в месте нахождения ЭПС, ближайшего к ТП Короли, фиксируется значение потенциала свыше 1 200 В.

Проведя исследования степени влияния величины сопротивления балласта при неизменном ак-

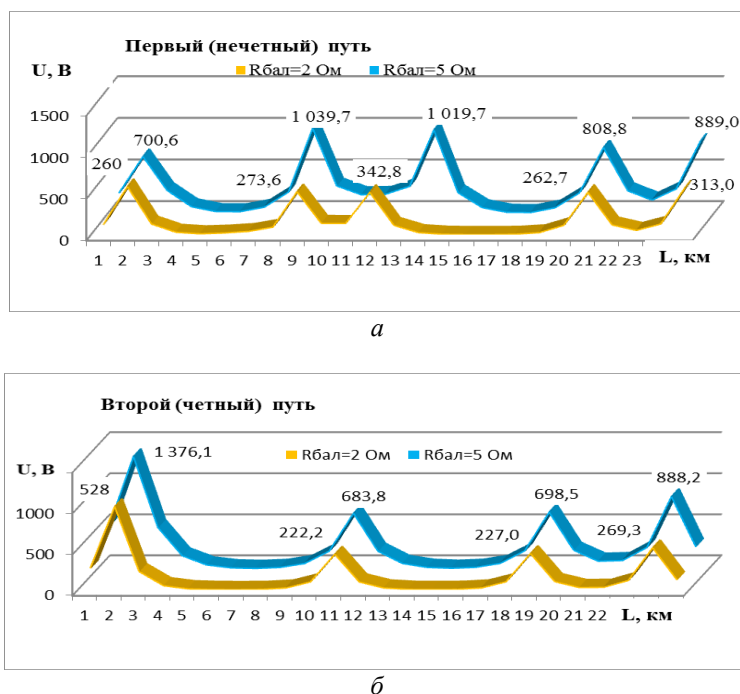


Рис. 7. Зависимости потенциала «рельс – земля» от длины пути и различного состояния балласта для нечетного (а) и четного (б) путей участка Завитая – Короли (сопротивление ДТ $R_{ДТ}=5$ Ом)

Fig. 7. Dependence of the «rail-track» potential upon track length and difference in the condition of the ballast for the odd (a) and even (b) tracks of the section Zavitaya – Koroli ($R_{ict}=5$ Ом)

тивном сопротивлении ДТ на потенциал, формируемый по длине пути, были получены графические зависимости, представленные для первого и второго пути (рис. 7).

При неизменной величине активного сопротивления ДТ $R_{дт}=5$ Ом и увеличении сопротивления балластного слоя наблюдается увеличение потенциала по длине пути по грузовому и не грузовому направлениям более, чем в три раза.

В этом случае формируются опасные для пробоя ИП напряжения как в местах нахождения ЭПС в середине межподстанционной зоны первого пути, так и при нахождении ЭПС вблизи подстанций по второму пути. Можно отметить, что по первому пути условия для пробоя искрового промежутка, что в итоге приведет к нарушению нормальной работы рельсовой цепи, складываются в 4 точках с пиками потенциальных диаграмм выше 800 В, а по четному пути – в трех точках.

Учитывая одновременность происходящего повышения потенциала в масштабе только одной реализации ГДП, можно отметить неблагоприятные с точки зрения эксплуатации системы тягового электроснабжения условия функционирования рельсовой цепи при мокром балластном слое.

Сочетание двух неблагоприятных факторов – роста активного сопротивления ДТ наряду с увлажнением (или загрязнением) балластного слоя значительно увеличивают потенциал по длине пути как грузового, так и негрузового направлений, создавая опасные условия для пробоя искровых промежутков, установленных на опорах контактной сети.

Одним из вариантов решения проблемы на рассматриваемом участке может стать замена ис-

кровых промежутков ИП-3 на защитные устройства с большим пробивным напряжением – на газоразрядные защитные устройства многократного действия ГРПЗ – 1У, у которых паспортное значение напряжения пробоя составляет 1400–1700 В.

Вторым вариантом решения проблемы роста потенциала может стать применение ДТ большей мощности и специальных конструкций, которые не будут нагреваться в процессе протекания по ним значительных величин тяговых токов, тем самым будут способны не увеличивать свое активное сопротивление.

Заключение

Проведенные исследования влияния обратного тягового тока при тяжеловесном движении и параметров отдельных элементов на работу рельсовых цепей позволяют заключить, что при повышении активного сопротивления ДТ тяговому току заметен существенный рост потенциалов «рельс – земля».

При повышении переходного сопротивления балластного слоя свыше 1,5–2 Ом·км происходит резкое увеличение потенциалов в точках нахождения нагрузки на межподстанционной зоне как грузового, так и не грузового направления.

Заблаговременное выявление критических значений и количественная оценка изменения потенциалов «рельс – земля» с использованием разработанной имитационной модели может быть полезна как в условиях эксплуатации существующих, электрифицированных участков железных дорог переменного тока, так и на стадии проектирования новых.

Список литературы

1. РЖД в цифрах // ОАО «РЖД»: сайт. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9377/page/103290?id=17127#main-header> (дата обращения 20.07.2021).
2. Пинчуков П.С., Макашева С.И. Устройства релейной защиты в условиях тяжеловесного движения // Железнодорожный транспорт. 2018. № 8. С. 40–42.
3. Власевский С.В., Григорьев Н.П., Трофимович П.Н. Встречное регулирование показателей работы в системе тягового электроснабжения переменного тока // Электротехника. 2019. № 7. С. 49–52. DOI: 10.3103/S1068371219070137.
4. Puzina E.Y., Cherniga M.Y., Khudonogov I.A. Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon-2020. 2020. С. 9271385. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271385.
5. Makasheva S., Pinchukov P., Kostin A. Increasing the Functional Stability of Distance Relay Protection for Various Types of Catenary Support Grounding // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Т. 1115 AISC. С. 155–166. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_17.
6. Пинчуков П.С., Макашева С.И., Костин А.П. Комплексная оценка работы релейной защиты тяговой сети переменного тока // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 7 (92). С. 27–38. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-7-27-38.
7. Шаманов В.И., Пультяков А.В., Трофимов Ю.А. Влияние условий эксплуатации на устойчивость работы АЛСН // Железнодорожный транспорт. 2009. № 5. С. 46–50.
8. Colella P., Pons E., Tortora A. Rail Potential Calculation: Impact of the Chosen Model on the Safety Analysis // 2018 AEIT International Annual Conference. 2018, pp. 1–6. DOI: 10.23919/AEIT.2018.8577295.
9. Lee C.H., Wang H.M. Effects of grounding schemes on rail potential and stray currents in Taipei Rail Transit Systems // Electric Power Applications, IEE Proceedings. 2001. P. 148–154. DOI: 10.1049/ip-epa:20010280.
10. Makasheva S.I. Simulation of a Return Current System for AC Power Traction Network // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. Vol. 272. С. 022071. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022071.

11. Makasheva S., Pinchukov P. Return traction current system's operation in cold climate regions International // Geotechnical Symposium "Geotechnical Construction of Civil Engineering & Transport Structures of the Asian-Pacific Region" (GCCETS 2018). MATEC Web of Conferences, 2019. Vol. 265. С. 02009. DOI: 10.1051/mateconf/201926502009.
12. Шаманов В.И. Проблемы электромагнитной совместимости рельсовых цепей с тяговой сетью // Автоматика на транспорте. 2019. Т. 5. № 2. С. 160–185. DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-160-185.
13. Балуев Н.И. Рельсовые цепи – вчера, сегодня, завтра ... // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 2. С. 30–31.
14. Ngamkhanong C., Kaewunruen S., Afonso Costa B. State-of-the-art review of railway track resilience monitoring // Infrastructures, 2018. No. 3. P. 3. DOI: 10.3390/infrastructures3010003.
15. Рожкин Б.В., Паранин А.В. Анализ условий работы рельсовой линии на основе моделирования растекания обратного тягового тока // Транспорт Урала. 2018. № 4 (59). С. 28–34. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-28-34.
16. Lucca G. Influence of railway line characteristics in inductive interference on railway track circuits. IET Sci. Meas. Technol., 2019. No. 13. Pp. 9–16. DOI: 10.1049/iet-smt.2018.5021.
17. Andrusca M., Adam M., Dragomir A., Lunca E., Seeram R., Postolache O. Condition Monitoring System and Faults Detection for Impedance Bonds from Railway Infrastructure // Applied Sciences. 2020. No. 10. Pp. 61–67. DOI:10.3390/app10186167 10.3390/app10186167.
18. ГИД УРАЛ-ВНИИЖТ: Справочная система // ГИД УРАЛ-ВНИИЖТ: сайт. URL: <http://gidural.ru/doku.php> (дата обращения 22.07.2021).
19. Yang S., Roberts C., Chen L. Development and performance analysis of a novel impedance bond for railway track circuits // Electrical Systems in Transportation. 2013. Vol. 3. Pp. 50–55. DOI:10.1049/iet-est.2013.0004.
20. Аркатов В.С., Аркатов Ю.В., Казеев С.В., Ободовский Ю.В. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: справочник Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: ООО «МиссияМ», 2006. 496 с.

References

1. RZHD v cifrah [RZD in numbers] [Electronic media]. URL: <https://eng.rzd.ru/en/9961> (Accessed 20.07.2021).
2. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Ustrojstva relejnoj zashchity v usloviyah tyazhelovesnogo dvizheniya [Relay protection devices in heavy haul conditions] *Zheleznodorozhnyj transport [Railway Transport]*, 2018, No. 8, pp. 40–42.
3. Vlasevsky S.V., Grigoriev N.P., Trofimovich P.N. Vstrechnoe regulirovanie pokazatelej raboty v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka. [Opposing Regulation of Performance Factors in an Alternating-Current Traction Power-Supply System]. *Russian Electrical Engineering*, 2019, Vol. 90, No. 7, pp. 522–525. DOI: 10.3103/S1068371219070137.
4. Puzina E.Y., Cherniga M.Y., Khudonogov I.A. Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon-2020*, 2020. p. 9271385. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271385.
5. Makasheva S., Pinchukov P., Kostin A. Increasing the Functional Stability of Distance Relay Protection for Various Types of Catenary Support Grounding. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, Vol. 1115, AISC. pp. 155–166. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_17.
6. Pinchukov P.S., Makasheva S.I., Kostin A.P. Kompleksnaya ocenka raboty` relejnoj zashchity` tyagovoj seti peremennogo toka [Complex estimate of relay protection operation of AC traction circuit]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Bryansk state technical university]*, 2020, No. 7(92), pp. 27–38. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-7-27-38.
7. Shamanov V.I., Pulyakov A.V., Trofimov Yu.A. Vliyanie uslovij ekspluatatsii na ustojchivost' raboty ALSN [Operating conditions influence on the stability of the automatic locomotive signaling]. *Zheleznodorozhnyj Transport [Railway Transport]*, 2009, No.5, pp. 46–50.
8. Colella P., Pons E., Tortora A. Rail Potential Calculation: Impact of the Chosen Model on the Safety Analysis *2018 AEIT International Annual Conference*, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.23919/AEIT.2018.8577295.
9. Lee C.H., Wang, H.M. Effects of grounding schemes on rail potential and stray currents in Taipei Rail Transit Systems. *Electric Power Applications, IEE Proceedings*. 2001, pp. 148–154. DOI: 10.1049/ip-epa:20010280.
10. Makasheva S.I. Simulation of a Return Current System for AC Power Traction Network *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 272, p. 022071. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022071.
11. Makasheva S., Pinchukov P. Return traction current system's operation in cold climate regions. *International Geotechnical Symposium "Geotechnical Construction of Civil Engineering & Transport Structures of the Asian-Pacific Region" (GCCETS 2018). MATEC Web of Conferences*, 2019, Vol. 265, p. 02009. DOI: 10.1051/mateconf/201926502009.
12. Shamanov V.I. Problemy elektromagnitnoj sovmestimosti rel'sovyh cepej s tyagovoj set'yu [Problems of electromagnetic compatibility of track circuits and traction network]. *Avtomatika na transporte [Automation on Transport]*, 2019, June. Vol. 5, No. 2, pp. 160–185. DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-160-185.
13. Baluev N.I. Rel'sovye cepi – vchera, segodnya, zavtra ... [Track circuits – yesterday, today and tomorrow]. *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, informatics]*, 2019, No. 2, pp. 30–31.
14. Ngamkhanong C., Kaewunruen S., Afonso Costa B. State-of-the-art review of railway track resilience monitoring. *Infrastructures* 2018. No. 3. P. 3. DOI: 10.3390/infrastructures3010003.
15. Rozhkin B.V., Paraniin A.V. Analiz uslovij raboty rel'sovoj linii na osnove modelirovaniya rastekaniya obratnogo tyagovogo toka [Analysis of rail track operation conditions on the basis of modeling return traction current spreading]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2018, No. 4(59), pp. 28–34. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-28-34.
16. Lucca G. Influence of railway line characteristics in inductive interference on railway track circuits. *IET Sci. Meas. Technol.*, 2019, No. 13, pp. 9–16. DOI: 10.1049/iet-smt.2018.5021.

17. Andrusca M., Adam M., Dragomir A., Lunca E., Seeram R., Postolache O. Condition Monitoring System and Faults Detection for Impedance Bonds from Railway Infrastructure. *Applied Sciences*, 2020, No. 10, pp. 61–67. DOI: 10.3390/app10186167.

18. GID URAL-VNIIZHT: Spravochnaya sistema [Reference system]. URL: <http://gidural.ru/doku.php> (Accessed 22.07.2021).

19. Yang S., Roberts C., Chen L. Development and performance analysis of a novel impedance bond for railway track circuits. *Electrical Systems in Transportation*, 2013, Vol. 3, pp. 50–55. DOI:10.1049/iet-est.2013.0004.

21. Arkatov V.S., Arkatov Yu.V., Kazeev S.V., Obodovsky Yu.V. Rel'sovye cepi magistral'nyh zheleznih dorog: Spravochnik – 3-e izdanie, pererab. i dop. [Rail chains of the main Railways: reference Book-3rd edition, revised and additional]. Moscow: OOO «MissiyaM», 2006. 496 p.

Информация об авторах

Пинчуков Павел Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, директор Электроэнергетического института, доцент кафедры систем электроснабжения, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: pinchukov-pavel@mail.ru

Макашева Светлана Игоревна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем электроснабжения, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: smakasheva@gmail.com

Information about the authors

Pavel S. Pinchukov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Director of the Electric Power Institute, the Subdepartment of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: pinchukov-pavel@mail.ru.

Svetlana I. Makasheva – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, the Subdepartment of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: smakasheva@gmail.com

Моделирование векторного управления асинхронным двигателем во вращающейся системе координат

А. В. Каминский¹✉, С. В. Коваленко¹, А. В. Гуляев², С. А. Шухарев²

¹Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация

²Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ 000618@pnu.edu.ru

Резюме

Развитие силовой полупроводниковой техники и технологии послужило основой для внедрения на подвижном составе новых типов частотно-регулируемого электропривода. При этом становится актуальной задача теоретического и экспериментального исследования различных режимов работы привода. В работе представлена математическая модель асинхронного двигателя во вращающейся системе координат $0 - d - q$, а также результаты моделирования, выполненные в пакете MatLab (Simulink). Для проверки полученных в теоретической части работы результатов был разработан экспериментальный стенд. Целью проведения эксперимента явилось получение зависимостей вращающего электромагнитного момента двигателя и его скорости в процессе пуска, а также сравнение полученных зависимостей соответствующими характеристиками, рассчитанными в результате имитационного моделирования. В работе использовался типовой четырехполюсный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором АИР71А4 с номинальной частотой вращения 1370 об./мин. Двигатель установлен в экспериментальном стенде, позволяющем с помощью электромагнитной муфты задать и вычислить электромагнитный момент на валу асинхронного двигателя. Это поможет проверить адекватность разрабатываемой имитационной модели двигателя. Полученная математическая модель может применяться при моделировании электрического привода в различных режимах его работы. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений свидетельствует о правомерности теоретических положений, принятых при разработке имитационной модели. Полученная в пакете программного обеспечения MatLab (Simulink) имитационная модель асинхронного двигателя адекватно определяет электромагнитные процессы и может быть использована при разработке векторной системы управления, а также в учебном процессе в рамках соответствующей дисциплины.

Ключевые слова

асинхронный двигатель, пространственный обобщающий вектор, вращающаяся система координат, математическое моделирование, MatLab (Simulink)

Для цитирования

Каминский А. В. Моделирование векторного управления асинхронным двигателем во вращающейся системе координат / А. В. Каминский, С. В. Коваленко, А. В. Гуляев, С. А. Шухарев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 50–58. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).50-58

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.09.2021, поступила после рецензирования: 22.09.2021, принята к публикации: 05.10.2021

Simulation of vector control of an asynchronous motor in a rotating system of coordinates

A. V. Kaminsky¹✉, S. V. Kovalenko¹, A. V. Gulyaev², S. A. Shukharev²

¹Pacific State University, Khabarovsk, the Russian Federation

²Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ 000618@pnu.edu.ru

Abstract

The development of power semiconductor engineering and technology served as the basis for the introduction of new types of frequency controlled electric drives on the rolling stock. At the same time, the problem of theoretical and experimental research of various operating modes of the drive becomes relevant. The paper presents a mathematical model of an asynchronous motor in a rotating coordinate system $0 - d - q$, as well as the results of modeling performed in the MatLab / Simulink package. To check the results obtained in the theoretical part of the work, an experimental stand was developed. The purpose of the experiment was to obtain the dependencies of the electromagnetic torque of the motor and its speed during the start-up process, as well as to compare the obtained dependencies with the corresponding characteristics calculated during the simulation. A typical four-pole asynchronous motor with a squirrel-cage rotor AIR71A4 with a rated speed of 1370 rpm was used in the work. The motor was installed in an experimental stand, which made it possible to set and calculate the electromagnetic torque on the asynchronous motor shaft using an electromagnetic clutch. That allowed to check the adequacy of the developed engine simulation model. The

obtained mathematical model can be used to simulate an electric drive in various operational modes. Comparative analysis of the calculated and experimental values indicates the validity of the theoretical positions adopted in the development of the simulation model. The simulation model of an induction motor obtained in the MatLab / Simulink software package adequately defines electromagnetic processes and can be used in the development of a vector control system, as well as in the educational process within the framework of the corresponding discipline.

Keywords

asynchronous motor, spatial generalizing vector, rotating coordinate system, math modeling, MatLab (Simulink)

For citation

Kaminsky A. V., Kovalenko S. V., Gulyaev A. V., Shukharev S. A. Modelirovanie vektornogo upravleniya asinkhronnym dvigatелеm vo vrashhayushheysya sisteme koordinat [Simulation of vector control of an asynchronous motor in a rotating system of coordinates]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 50–58. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).50-58

Article Info

Received: 15.09.2021, Revised: 22.09.2021, Accepted: 05.10.2021

Введение

Развитие силовой полупроводниковой техники и технологии послужило основой для внедрения на подвижном составе электрических железных дорог принципиально новых типов частотно-регулируемого электропривода с тяговыми асинхронными двигателями. При этом становится актуальной задача теоретического и экспериментального исследования различных режимов работы привода. В настоящее время применяются несколько методов имитационного моделирования для оценки работы асинхронного двигателя в статических и динамических режимах без трудоемких натурных испытаний. На сегодняшний день для моделирования работы электротехнических систем применяются преимущественно программные разработки, к числу которых относятся Maple, MathCad, MatLab, OrCad и др.

В работе использовался типовой четырехполюсный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором АИР71А4 с номинальной частотой вращения 1370 об./мин. [1]. Этот двигатель установлен в экспериментальном стенде, позволяющем с помощью электромагнитной муфты задать и вычислить электромагнитный момент на валу асинхронного двигателя. Это помогает проверить адекватность разрабатываемой имитационной модели двигателя. Полученная математическая модель может применяться при моделировании электрического привода в различных режимах его работы.

Двухфазная система координат $\alpha - \beta - 0$

Теоретической основой для построения систем управления асинхронным приводом послужила теория мгновенных мощностей, разработанная Н. Акаги в 1984 г. ($p-q$ -теория) [2]. Она базируется на определении мгновенных мощностей трехфазной цепи с нулевым и без нулевого провода и применяется как для установившихся, так и переходных режимов работы трехфазной электрической цепи.

Расчет мгновенной мощности трехфазной электрической цепи основан на преобразовании трехфазных напряжений и токов из системы координат $a - b - c$ в двухфазную систему координат $\alpha - \beta - 0$. Эти системы координат являются неподвижными. Указанное преобразование получило название «прямое преобразование Кларк» в честь женщины инженера-электрика Edith Clarke [3]. Обратное преобразование из системы координат $\alpha - \beta - 0$ в трехфазную систему координат $a - b - c$ получило название «обратное преобразование Кларк» [4].

Современные алгоритмы описания работы трехфазных асинхронных двигателей базируются на представлении электромагнитных величин в виде направленных векторов. Будем считать, что совокупность симметричных трехфазных ЭДС и токов может быть получена с помощью генератора, в статоре которого по осям $a - b - c$ расположены три обмотки (рис. 1, а).

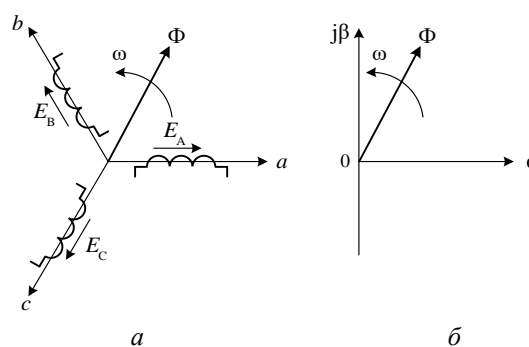


Рис. 1. Трехфазная (а) и двухфазная (б) системы координат

Fig. 1. Three-phase (a) and two-phase (b) coordinate systems

Внутри генератора против часовой стрелки со скоростью ω вращается ротор, создающий магнитный поток Φ , пересекающий поочередно обмотки фаз А, В и С статора и создающий трехфазную сим-

метричную систему ЭДС $E_A - E_C$. Направление векторов ЭДС в обмотках статора совпадают с направлением трехфазных осей $a - b - c$.

Двухфазная система координат $\alpha - \beta - 0$ показана в виде комплексной плоскости, образованной двумя взаимно перпендикулярными осями α и $j\beta$ (см. рис. 1, б). При этом вещественная ось (Re) $0 - \alpha$ совпадает с осью $0 - a$ трехфазной системы координат. На мнимой оси $j\beta$ комплексной плоскости откладываются мнимые составляющие напряжений и токов.

Преобразование Кларк значительно упрощает описание электромагнитных процессов в трехфазной сети, представленных в виде одного пространственного вектора напряжения и тока. Это позволяет создавать эффективные системы управления асинхронным приводом, основанными на векторном представлении электрических величин.

Переход к двухфазной системе координат эквивалентен представлению пространственного вектора тока или напряжения трехфазной системы в виде двухфазной модели в новой прямоугольной системе координат $\alpha - \beta - 0$ с сохранением того же значения пространственного вектора.

Пусть имеется некоторый пространственный вектор \dot{I} в трехфазной системе координат $a - b - c$, представленный проекциями токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ на каждую из осей (рис. 2).

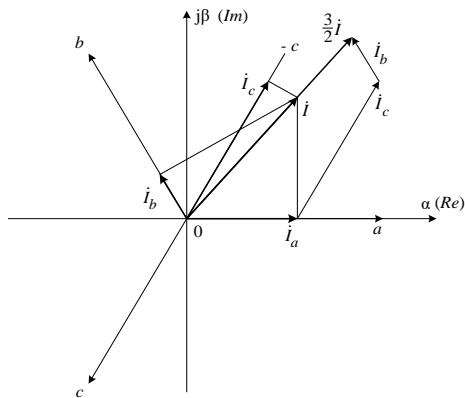


Рис. 2. Синтез обобщенного вектора в системе координат $\alpha - \beta - 0$
Fig. 2. Synthesis of a generalized vector in a coordinate system $\alpha - \beta - 0$

Если сложить эти векторы в прямоугольной системе координат $\alpha - \beta - 0$, то получим пространственный вектор $3/2 \dot{I}$, в $3/2$ раза превышающий пространственный вектор \dot{I} трехфазной системы координат. Следовательно, для выполнения указанного выше условия эквивалентной замены токов, необходимо полученный пространственный вектор уменьшить в полтора раза, умножив на $2/3$.

В общем случае трехфазная симметричная система может быть представлена системой синусоидальных напряжений [5]:

$$\begin{aligned} u_A &= U_m \sin \omega t, \\ u_B &= U_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \\ u_C &= U_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

т. е. вектор напряжения \dot{U}_B в фазе B отстает от вектора \dot{U}_A на $2\pi/3$, а вектор напряжения \dot{U}_C опережает вектор \dot{U}_A на тот же угол $2\pi/3$. Эти напряжения соответствуют напряжениям прямой последовательности системы синусоидальных напряжений.

Суммарный вектор трехфазного напряжения можно представить в виде

$$\dot{U} = \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C.$$

Пространственный (обобщенный) вектор напряжения \dot{U}_S в двухфазной системе координат $\alpha - \beta - 0$ с учетом полученного ранее коэффициента приведения $2/3$ определяется уравнением

$$\begin{aligned} \dot{U}_S &= \frac{2}{3} \dot{U} = \frac{2}{3} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \\ &= \frac{2}{3} (u_A + a u_B + a^2 u_C), \end{aligned} \quad (2)$$

где u_A, u_B, u_C – мгновенные значения напряжений, определяемых (1); a – оператор поворота.

В уравнении (2) используются следующие значения операторов:

$$\begin{aligned} a &= e^{j2\pi/3}; \\ a^2 &= e^{j4\pi/3} = e^{-j2\pi/3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Проекции единичных по длине операторов поворота a и a^2 на оси α и $j\beta$ двухфазной системы координат можно определить с помощью (рис. 3).

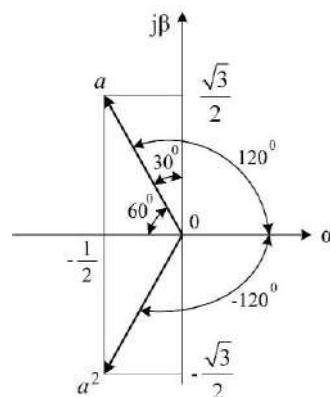


Рис. 3. Операторы поворота на плоскости $\alpha - \beta - 0$
Fig. 3. Rotation operators on a plane $\alpha - \beta - 0$

Из рисунка следует, что проекции векторов поворота на вещественную α и мнимую $j\beta$ оси составляют:

$$a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$a^2 = e^{-j2\pi/3} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Подставляя полученные значения операторов (3) в (2) с учетом (1) получим:

$$\dot{U}_S = \frac{2}{3} \left[\begin{aligned} &U_m \sin \omega t + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot U_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \\ &+ \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot U_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \right] \quad (5)$$

Дальнейшие преобразования выражения (5) выполним с учетом следующих соотношений:

$$\sin\left(\omega t \pm \frac{2\pi}{3}\right) = \sin \omega t \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \pm \cos \omega t \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right);$$

$$\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}; \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

После преобразования получим:

$$\dot{U}_S = U_m (\sin \omega t - j \cos \omega t). \quad (6)$$

Из анализа полученного выражения следует, что амплитудное значение U_m обобщенного вектора \dot{U}_S совпадает с амплитудами трехфазных синусоидальных напряжений u_A, u_B и u_C . Диаграммы этих напряжений показаны на (рис. 4). Вещественная $u_\alpha = U_m \cdot \sin \omega t$ и мнимая $u_\beta = -U_m \cdot \cos \omega t$ – составляющие обобщенного вектора (рис. 4, в) являются, соответственно, функциями синуса и минус косинуса [6].

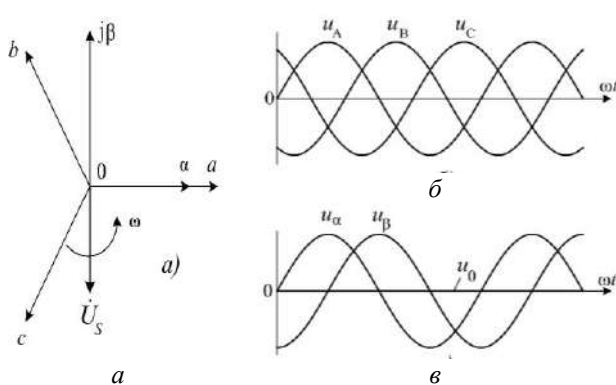


Рис. 4. Диаграммы напряжений в различных системах координат
Fig. 4. Voltage diagrams in different coordinate systems

Для определения положения обобщенного вектора на комплексной плоскости $\alpha - \beta - 0$ преобразуем выражение (6) к стандартной тригонометри-

ческой форме с одним аргументом. После подстановки в (6) известных соотношений: $\sin \omega t = \cos(\pi/2 - \omega t)$ и $\cos \omega t = \sin(\pi/2 - \omega t)$ получим:

$$\dot{U}_S = U_m [\cos(\pi/2 - \omega t) - j \sin(\pi/2 - \omega t)].$$

Полученное выражение представим в показательной форме:

$$\dot{U}_S = U_m e^{-j(\pi/2 - \omega t)} = U_m e^{j(\omega t - \pi/2)} = U_m e^{-j\pi/2}.$$

Положение вектора \dot{U}_S на плоскости показано на (см. рис. 4, а). Из полученного выражения следует, что начальное положение вектора при $t = 0$ соответствует углу $(-\pi/2)$ относительно вещественной оси α комплексной плоскости $\alpha - \beta - 0$. Вращение вектора \dot{U}_S с угловой частотой ω позволяет получить его проекции u_A, u_B и u_C на оси трехфазной системы координат a, b и c (см. рис. 4, б).

Таким образом, трехфазная система напряжений u_A, u_B и u_C (см. рис. 4, б) может быть представлена одним обобщенным вектором \dot{U}_S на комплексной плоскости $\alpha - \beta - 0$ (см. рис. 4, а).

Моделирование работы трехфазного асинхронного двигателя основано на применении вращающейся системы координат, которая регулируется автоматически до достижения синхронизации с вектором напряжения U_s , который вращается с угловой скоростью ω_1 .

Далее показан переходной режим работы системы управления двигателем (рис. 5). Пространственный вектор напряжения U_s вращается с постоянной скоростью ω_1 . Когда скорость вращения системы координат $0 - d - q$ станет равной ω_1 , а также при равенстве $\theta = \theta_1$, выполняется условие синхронизации (рис. 5, б).

При этом в процессе регулирования величина угла θ может иметь либо постоянное, либо изменяющееся значение. В переходном режиме угол θ изменяется произвольным образом, для системы координат $0 - d - q$, вращающейся с постоянной угловой скоростью $\omega = \omega_1$, угол $\theta = \omega t$ изменяется во времени t линейно в пределах от 0 до 2π .

Из (рис. 5, а) следует, что переход из неподвижной системы координат $\alpha - \beta - 0$ к вращающейся системе координат $0 - d - q$ [7], повернутой на некоторый угол θ относительно $\alpha - \beta - 0$ может быть реализован с помощью оператора поворота $e^{-j\theta}$:

$$\left(\dot{U}_S\right)_{0-d-q} = \left(\dot{U}_S\right)_{\alpha-\beta} \cdot e^{-j\theta}, \quad (7)$$

иначе говоря вектор напряжения \dot{U}_S во вращающейся системе координат $0 - d - q$ повернут на угол θ относительно неподвижной системы координат $\alpha - \beta - 0$ по часовой стрелке, что указывается знаком « \leftarrow » в операторе поворота в выражении (7).

Из анализа (рис. 5, а) следует, что проекции обобщенного вектора U_s на координатные оси $0 - d - q$ определяются как

$$\dot{U}_{s-d} = \dot{U}_s \cdot \cos \delta; \dot{U}_{s-q} = \dot{U}_s \cdot \sin \delta.$$

Если синхронную систему координат $0 - d - q$ сориентировать по вектору напряжения U_s , то проекция на вещественную ось d будет равна длине (модулю) вектора $\dot{U}_{s-d} = \|\dot{U}_s\|$, а проекция на ось q будет равна нулю $\dot{U}_{s-q} = 0$.

Из изложенного следует, что при известном значении угла θ между вращающейся $0 - d - q$ и неподвижной $\alpha - \beta - 0$ систем координат можно представить мгновенные значения пространственного вектора в виде проекций оси d и q вращающейся системы координат $0 - d - q$.

Уравнения асинхронного двигателя во вращающейся системе координат $0 - d - q$

Из уравнения статора и ротора обобщенной электрической машины, положив $u_2 = 0$, можно получить выражения для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. В системе координат $0 - d - q$, вращающейся синхронно с магнитным полем статора, соответствующие уравнения для цепи статора и ротора принимают вид:

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j\omega_1 \psi_1, \quad (8)$$

$$0 = R_2' i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + j[\omega_1 - \omega] \psi_2, \quad (9)$$

где ω_1 – частота вращения магнитного поля статора, ω – частота вращения ротора, $\omega_2 = \omega_1 - \omega$ – частота вращения магнитного поля ротора [8–11].

Частота вращения ротора ω в модели двигателя может быть выражена через величину механической угловой скорости вращения ротора Ω :

$$\omega = z_p \cdot \Omega,$$

где z_p – число пар полюсов двигателя [12].

В этом случае выражение (9) принимает вид:

$$0 = R_2' i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + j[\omega_1 - \Omega \cdot z_p] \cdot \psi_2.$$

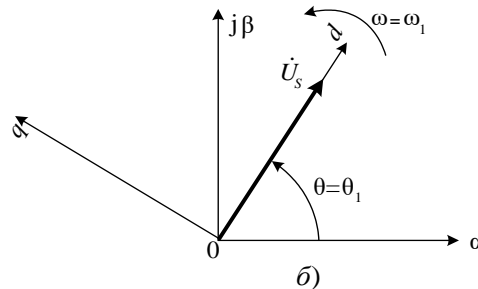
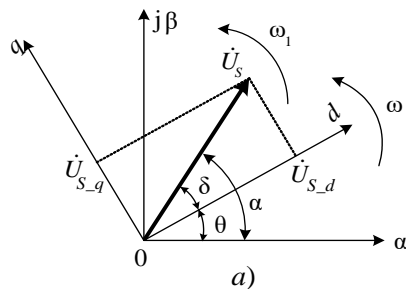


Рис. 5. Положение пространственного вектора U_s в $0 - d - q$ осях

Fig. 5. Position of the space vector U_s in $0 - d - q$ axes

Потокосцепления статора ψ_1 и ротора ψ_2 , выраженные через величины токов статора i_1 и ротора i_2 , имеют вид:

$$\psi_1 = L_1 i_1 + L_m i_2, \quad (10)$$

$$\psi_2 = L_m i_1 + L_2 i_2, \quad (11)$$

где L_m – индуктивность намагничивания двигателя [13].

Индуктивности статора L_1 и ротора L_2 в уравнениях (10) и (11) с учетом соответствующих индуктивностей рассеяния $L_{1\sigma}$ и $L_{2\sigma}$ определяются выражениями:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma}; L_2 = L_m + L_{2\sigma}.$$

Выражая ток i_2 из уравнения (11) и подставляя его в выражение (10), получаем уравнение для вычисления потокосцепления статора:

$$\psi_1 = \frac{L_m}{L_2} \psi_2 + i_1 L_1 \left(1 - \frac{L_m}{L_1} \cdot \frac{L_m}{L_2} \right). \quad (12)$$

Обозначим значения коэффициентов электромагнитной связи статора и ротора как

$$K_1 = \frac{L_m}{L_1} \text{ и } K_2 = \frac{L_m}{L_2}, \quad (13)$$

а также значение эквивалентной индуктивности

$$L_3 = L_1 (1 - K_1 K_2) = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}. \quad (14)$$

С учетом (13) и (14) уравнение (12) принимает вид:

$$\psi_1 = \psi_2 K_2 + i_1 L_3.$$

Подставляя полученное выражение в уравнение (8) для напряжения цепи статора, получим:

$$u_1 = R_1 i_1 + K_2 \frac{d\psi_2}{dt} + L_3 \frac{di_1}{dt} + j\omega_1 \psi_2 K_2 + j\omega_1 i_1 L_3.$$

Преобразуем полученное уравнение с учетом оператора Лапласа $p = \frac{d}{dt}$:

$$u_1 = R_1 i_1 + K_2 p \psi_2 + L_3 p i_1 + j\omega_1 \psi_2 K_2 + j\omega_1 i_1 L_3.$$

Выразим в полученном уравнении векторы напряжения u_1 , тока i_1 и потокосцепления ψ_2 в комплексной форме:

$$u_1 = u_{1d} + ju_{1q}; i_1 = i_{1d} + ji_{1q}; \Psi_2 = \Psi_{2d} + j\Psi_{2q}. \quad (15)$$

В системе координат $0 - d - q$, вращающейся синхронно с вектором потокосцепления ротора Ψ_2 , его проекции на оси d и q равны:

$$\Psi_{2d} = \Psi_2; \Psi_{2q} = 0. \quad (16)$$

В соответствии с этим для проекций вектора напряжения u_1 на оси d и q можно записать:

$$\begin{aligned} u_{1d} &= R_1 i_{1d} + K_2 \frac{d\Psi_2}{dt} + L_\Sigma \left[\frac{di_{1d}}{dt} - \omega_1 i_{1q} \right]; \\ u_{1q} &= R_1 i_{1q} + K_2 \omega_1 \Psi_2 + L_\Sigma \left[\frac{di_{1q}}{dt} + \omega_1 i_{1d} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Уравнения (17) описывают схему замещения обобщенной электрической машины (рис. 6).

Выражая из уравнения (11) величину неконтролируемого по величине тока ротора i_2 и подставляя его в выражение (9) для напряжения цепи ротора, получим:

$$\frac{\Psi_2}{L_2} R_2' - \frac{L_m}{L_2} R_2' i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} + j[\omega_1 - \Omega \cdot z_p] \cdot \Psi_2 = 0. \quad (18)$$

Выполнив аналогичные преобразования уравнения (18) в соответствии с (15) и (16), получим выражения для проекций уравнения (18) на оси d и q :

$$\begin{aligned} \frac{R_2'}{L_2} \Psi_2 - R_2' \frac{L_m}{L_2} i_{1d} + \frac{d\Psi_2}{dt} &= 0; \\ R_2' \frac{L_m}{L_2} i_{1q} - [\omega_1 - \Omega \cdot z_p] \cdot \Psi_2 &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Выражая из первого уравнения системы (19) величину производной потокосцепления $d\Psi_2/dt$ и подставляя ее в формулу (17) для проекции напряжения u_{1d} на вещественную ось d вращающейся системы $0 - d - q$, после проведенных преобразований получим:

$$u_{1d} = R_\Sigma \cdot (pT_\Sigma + 1) i_{1d} - L_\Sigma \omega_1 i_{1q} - R_2' \frac{L_m}{L_2} \Psi_2. \quad (20)$$

Выражая из второго уравнения системы (19) величину $\omega_1 \Psi_2$ и подставляя ее в формулу (17) для проекции напряжения u_{1q} на мнимую ось системы $0 - d - q$, после проведенных преобразований получим:

$$u_{1q} = R_\Sigma \cdot (pT_\Sigma + 1) i_{1q} + L_\Sigma \omega_1 i_{1d} + K_2 \Psi_2 \Omega \cdot z_p. \quad (21)$$

В уравнениях (20) и (21) обозначено:
– эквивалентное сопротивление:

$$R_\Sigma = R_1 + K_2^2 R_2';$$

– эквивалентная индуктивность L_Σ определена выше в уравнении (14);

– эквивалентная постоянная времени

$$T_\Sigma = L_\Sigma / R_\Sigma.$$

Из первого уравнения системы (19) можно выразить соотношение:

$$\frac{\Psi_2}{i_{1d}} = \frac{R_2' L_m}{pL_2 + R_2'}. \quad (22)$$

После умножения и деления правой части (22) на величину R_2' , получим:

$$\frac{\Psi_2}{i_{1d}} = \frac{L_m}{T_2 p + 1}, \quad (23)$$

где $T_2 = L_2 / R_2'$ – постоянная времени цепи ротора.

Уравнения модели асинхронного двигателя

Уравнения (20), (21) и (23) являются математической основой для создания электрической составляющей имитационной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Электромагнитный момент $M_{ЭМ}$ рассчитывается в соответствии с выражением:

$$M_{ЭМ} = \frac{3}{2} z_p K_2 \Psi_2 i_{1q}.$$

Угловая частота вращения магнитного поля статора ω_1 в модели двигателя определяется в соответствии со вторым уравнением системы (19) с учетом числа пар полюсов z_p по формуле:

$$\omega_1 = \frac{R_2' K_2}{\Psi_2} i_{1q} + \Omega \cdot z_p.$$

Уравнение электромеханического равновесия в модели двигателя представляется в виде

$$M_{ЭМ} - M_C = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (24)$$

где M_C – момент сопротивления на валу двигателя; J – момент инерции, приведенный к валу двигателя.

В соответствии с уравнениями (20), (21), (23)

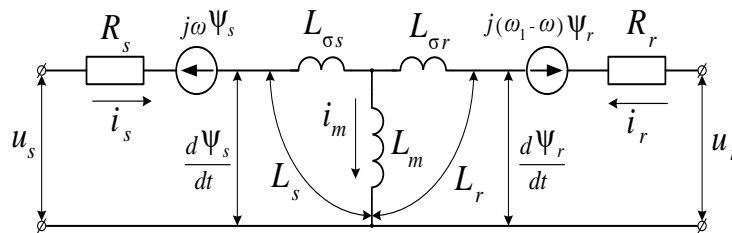


Рис. 6. Схема замещения обобщенной электрической машины
Fig. 6. Equivalent circuit of a generalized electrical machine

и (24) разработана математическая модель асинхронного двигателя, реализованная в пакете программ Matlab. Структурная схема модели представлена на рис. 7.

Величина потокосцепления ротора $\Psi_{2_опт}$, соответствующая минимальной величине статорного тока при фиксированной величине момента M_{em} рассчитывается по формуле:

$$\Psi_{2_опт} = \sqrt{\frac{2M_{em} \cdot (L_{\sigma 1} + L_m)}{3z_p}}$$

Из этого уравнения можно получить значение момента M_{em} используемое в дальнейших расчетах:

$$M_{em} = \frac{3}{2} z_p \Psi_{2_опт}^2 \frac{1}{L_{\sigma 1} + L_m}$$

Экспериментальная часть

Для проверки полученных результатов был разработан лабораторный стенд (рис. 8). Целью проведения эксперимента явилось получение зависимостей вращающего электромагнитного момента двигателя и его скорости в процессе пуска, а также сравнение полученных зависимостей соответствующими характеристиками, рассчитанными в результате имитационного моделирования. Установка состоит из асинхронного двигателя 4АМХ71А4У3 и

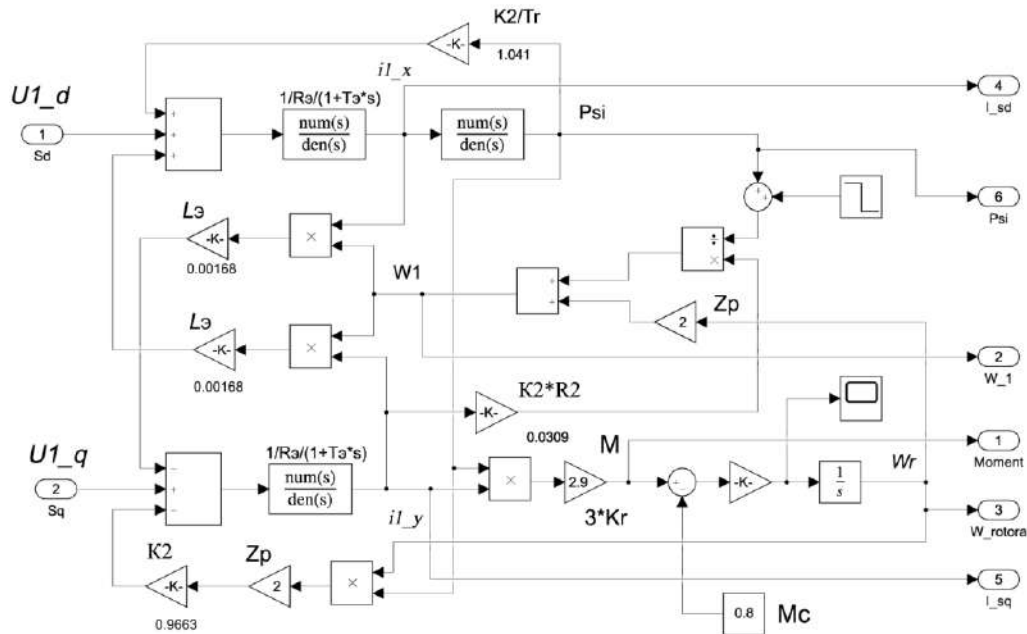


Рис. 7. Математическая модель двигателя

Fig. 7. Engine mathematical model

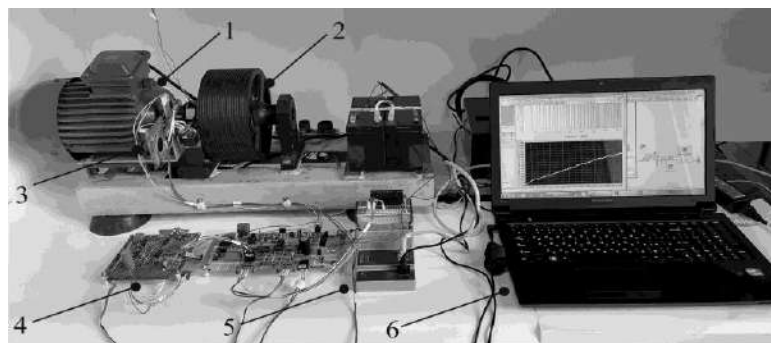


Рис. 8. Внешний вид экспериментального стенда:

- 1 – асинхронный двигатель; 2 – электромагнитный тормоз; 3 – модуль измерения скорости;
4 – модуль измерения момента; 5 – унифицированная платформа CompactDAQ с установленным
в ней модулем многоканального сбора данных NI – 9205; 6 – персональный компьютер

Fig. 8. Exterior of the experimental stand:

- 1 – asynchronous motor; 2 – electromagnetic brake; 3 – speed measurement module; 4 – torque measurement
module; 5 – unified CompactDAQ platform with the NI-9205 multichannel data acquisition module installed in it;
6 – personal computer

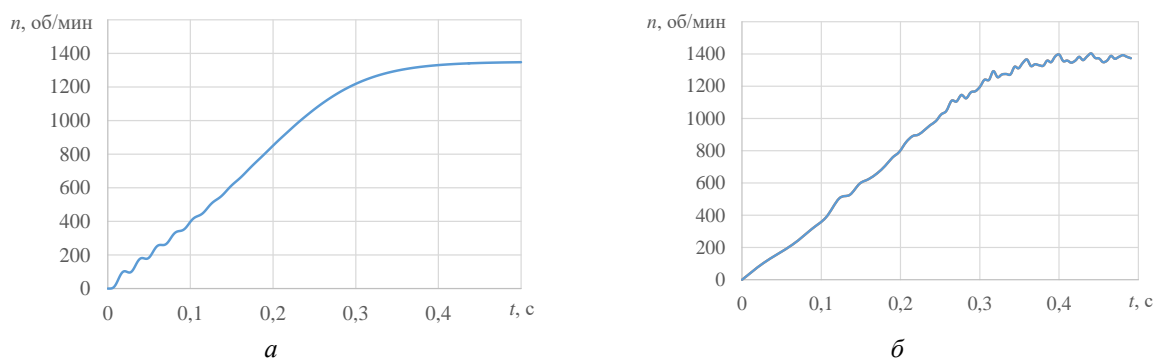


Рис. 9. Скорость вращения двигателя:
 а – расчетные значения; б – экспериментальные значения

Fig. 9. Motor rotation speed:

a – calculated values; b – experimental values

расположенной соосно с ним электромагнитной муфты. С помощью муфты на валу двигателя устанавливается тормозной момент, величина которого задается током в обмотке возбуждения муфты. Модуль измерения момента содержит измерительный мост, состоящий из тензорезисторов и усилителя сигнала, пропорционального тормозному моменту, снимаемого с диагонали моста. В модуле измерения скорости двигателя установлена оптопара, сигнал которой представляет собой последовательность прямоугольных импульсов с изменяющимися в процессе разгона двигателя параметрами: длительностью импульса и паузы.

Перечисленные модули измерения момента и скорости являются составными частями программно-аппаратного комплекса.

Измеренные с помощью модуля многоканального сбора данные поступают на персональный компьютер для последующей их обработки. Программная часть комплекса разработана в среде графического программирования LabView.

Получены графики зависимостей момента M_{em} на валу двигателя и скорости его вращения n на интервале от момента пуска и до выхода на установившийся режим работы (рис. 9).

Из анализа рис. 9 следует, что расчетные и экспериментальные значения скоростей близки или совпадают. Это свидетельствует о правомерности теоретических положений, принятых при разработке имитационной модели. Сравнение кривых электромагнитного момента не представляется возможным в связи с различным характером изменения их значений во время пуска двигателя.

Заключение

Таким образом, полученная в пакете программного обеспечения MatLab (Simulink) [14–16] имитационная модель двигателя адекватно определяет электромагнитные процессы и может быть использована при разработке векторной системы управления [17, 18], а также в рамках учебного процесса соответствующей дисциплины.

Список литературы

1. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И. и др. Асинхронные двигатели серии 4А. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
2. Akagi H., Kanazawa Y. and Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components // IEEE Transaction on Industry Applications, 1984. Vol. IA-20, no. 3. Pp. 625–630.
3. Edith Clarke. Circuit Analysis of AC Power Systems. Vol. 1, Wiley, New York, 1943.
4. Bellan D. Clarke Transformation Solution of Asymmetrical Transients in Three-Phase Circuits. Energies. 2020.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Гардарики, 2000. 638 с.
6. Кулинич Ю.М. Компенсация реактивной мощности. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2020. 182 с.
7. Milanés-Montero M.I., Romero-Cadaval E., de Marcos A.R., et al. Novel Method for Synchronization to Disturbed Three-Phase and Single-Phase Systems // Industrial Electronics, 2007. IEEE International Symposium on Date 4–7 June 2007. Pp. 860–865.
8. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронным двигателем. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2006. 94 с.
9. Терёхин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (MatLab 7.0.1). Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 320 с.
10. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. 66 с.
11. Калачёв Ю.Н. SimInTex: моделирование в электроприводе. М.: ДМК Пресс, 2019. 98 с.
12. Вольдек А.И. Электрические машины. М.: Изд-во Энергия, 1974. 839 с.
13. Мигдалёнок А.А. Моделирование электропривода на ЭВМ. Минск: Изд-во БНТУ, 2010. 94 с.

14. Дьяконов В.П. Simulink: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2015. 782 с.
15. Eshkabilov S. Beginning MATLAB and Simulink: From Novice to Professional. Apress. 2019. 544 p.
16. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. СПб.: Лань, 2013. 448 с.
17. Yousef A. Abdel maksoud S. Review on Field Oriented Control of Induction Motor // International Journal For Research In Emerging Science And Technology. 2015. Vol. 12, no. 2(7).
18. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электропривода переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.

References

1. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I. etc. Asinkhronnye dvigateli serii 4A [Asynchronous motors of the 4A series]. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 504 p.
2. Akagi H., Kanazawa Y. and Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 1984. Vol. IA-20, No. 3, pp. 625–630.
3. Edith Clarke. Circuit Analysis of AC Power Systems. Vol. 1, Wiley, New York, 1943.
4. Bellan D. Clarke Transformation Solution of Asymmetrical Transients in Three-Phase Circuits. *Energies*. 2020.
5. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy ehlektrotehniki [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. Moscow: Gardariki Publ., 2000. 638 p.
6. Kulinich Yu.M. Kompensatsiya reaktivnoj moshhnosti [Reactive power compensation]. Moscow: Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2020. 182 p.
7. Milanés-Montero M.I., Romero-Cadaval E., de Marcos A.R., et al. Novel Method for Synchronization to Disturbed Three-Phase and Single-Phase Systems. *Industrial Electronics, 2007. IEEE International Symposium on Date 4–7 June 2007*. pp. 860–865.
8. Usoltsev A.A. Chastotnoe upravlenie asinkhronnym dvigatelem [Frequency control of an asynchronous motor]: Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet informatsionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki Publ., 2006. 94 p.
9. Terekhin V.B. Modelirovanie sistem ehlektroprivoda v Simulink (MatLab 7.0.1) [Simulation of electric drive systems in Simulink (MatLab 7.0.1)]. Tomsk: Tomskij politehnicheskij universitet Publ., 2008. 320 p.
10. Pankratov V.V. Vektornoe upravlenie asinkhronnymi ehlektroprivodami [Vector control of asynchronous electric drives]. Novosibirsk: Novosibirskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet Publ., 1999. 66 p.
11. Kalachev Yu.N. SimInTex: modelirovanie v ehlektroprivode [SimInTech: Simulation in an electric drive]. Moscow: DМК Press Publ., 2019. 98 p.
12. Voldek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric cars]. Moscow: Energiya Publ., 1974. 839 p.
13. Migdalenok A.A. Modelirovanie ehlektroprivoda na EVM [Simulation of an electric drive on a computer]. Minsk: Belorusskij natsional'nyj tekhnicheskij universitet Publ., 2010. 94 p.
14. Dyakonov V.P. Simulink: samouchitel' [Simulink: Tutorial]. Moscow: DМК Press Publ., 2015. 782 p.
15. Eshkabilov S. Beginning MATLAB and Simulink: From Novice to Professional. Apress. 2019. 544 p.
16. German-Galkin S.G. Virtual'nye laboratorii poluprovodnikovyx sistem v srede Matlab-Simulink [Virtual laboratories of semiconductor systems in the Matlab-Simulink environment]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2013. 448 p.
17. Yousef A. Abdel maksoud S. Review on Field Oriented Control of Induction Motor n. *International Journal For Research In Emerging Science And Technology*, 2015, Vol. 12, No. 2(7).
18. Schreiner R.T. Matematicheskoe modelirovanie ehlektroprivoda peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty [Mathematical modeling of an alternating current electric drive with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg: URO RAN Publ., 2000. 654 p.

Информация об авторах

Каминский Александр Викторович – канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра автоматизации и системотехники, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, e-mail: 000618@pnu.edu.ru.

Коваленко Сергей Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и системотехники, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, e-mail: 004936@pnu.edu.ru.

Гуляев Александр Викторович – доцент кафедры электротехники, электроники и электромеханики, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: 89143127984@ya.ru.

Шухарев Сергей Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: shuharevsa@gmail.com

Information about the authors

Alexander V. Kaminsky – Ph.D in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Subdepartment of Automation and Systems Engineering, Pacific State University, Khabarovsk, e-mail: 000618@pnu.edu.ru.

Sergey V. Kovalenko – Ph.D in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Automation and Systems Engineering, Pacific State University, Khabarovsk, e-mail: 004936@pnu.edu.ru.

Alexander V. Gulyaev – Associate Professor of the Subdepartment of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: 89143127984@ya.ru.

Sergey A. Shukharev – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Transport of Railways, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: shuharevsa@gmail.com

Разработка мероприятий по устранению ложного срабатывания телесигнализации системы телемеханики аппаратуры микропроцессорной телемеханики в границах Читинской дистанции электроснабжения Забайкальской железной дороги – филиала ОАО «РЖД»

А. В. Роголёв¹✉, А. Г. Емельянов¹, С. Н. Андалиев²

¹ *Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация*

² *Читинская дистанция электроснабжения Забайкальской дирекции по энергообеспечению – структурного подразделения Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД», г. Чита, Российская Федерация*

✉ a_rogalev@inbox.ru

Резюме

Статья посвящена актуальной проблеме наличия случайного ложного срабатывания подсистемы телесигнализации системы телемеханики аппаратуры микропроцессорной телемеханики. Детально проанализированы пути возможного попадания помехи во входные / выходные цепи модулей преобразования сигналов телесигнализации стойки ТУ-ТС АМТ-002, размещенной на посту электрической централизации станции Тургутуй, располагаемой в границах Читинской дистанции электроснабжения ЭЧ-1 Забайкальской железной дороги. Для исследования работы подсистемы телесигнализации аппаратуры микропроцессорной телемеханики была разработана имитационная модель входных цепей модулей оптронов системы телемеханики МСТ-95 и аппаратуры микропроцессорной телемеханики. Проведена оценка степени влияния схемотехнического решения на чувствительность входного элемента модуля оптронов системы телемеханики МСТ-95 и аппаратуры микропроцессорной телемеханики. В имитационную модель были заложены реальные параметры электронных компонентов стоек МСТ-95 и аппаратуры микропроцессорной телемеханики. На основании исполненных в программном комплексе «Мультисим 11.0» расчетов были определены реакции на воздействие помехи при четырех различных вариантах исключения ложного срабатывания. Проведенное имитационное моделирование показало, что на степень чувствительности входных цепей модулей оптронов систем телемеханики МСТ-95 и аппаратуры микропроцессорной телемеханики большое влияние оказывает входное сопротивление модуля оптронов. При этом под воздействием существенных по величине помех, превышающих паспортные значения напряжения срабатывания оптронов, вызывает срабатывания последних и в итоге приводит к появлению у энергодиспетчера дистанции электроснабжения ложной индикации срабатывания телесигнализации. При этом под воздействием напряжения помехи происходит формирование напряжения во входных цепях оптронов, приводящее к его нештатному срабатыванию. Выявлено, что повышение чувствительности у модуля оптронов системы телемеханики аппаратуры микропроцессорной телемеханики по сравнению с МСТ-95, заложенное конструктивно, является источником нештатного срабатывания фототранзистора оптрона как при наличии напряжения помехи, так и при ее отсутствии. Отмечено, что в условиях эксплуатации существующих схем модуля оптронов аппарата микропроцессорной телемеханики приводит к наличию ложного срабатывания подсистемы телесигнализации, что является существенным ограничением при организации энергодиспетчерского управления конфигурацией системы тягового электроснабжения. Это критически важно для обеспечения надежного и эффективного перевозочного процесса в границах Читинской дистанции электроснабжения ЭЧ-1 Забайкальской дирекции энергообеспечения.

Ключевые слова

телесигнализация, система телемеханики, сигнал помехи, «сухой» датчик-контакт, чувствительность модуля оптронов, ложное срабатывание, светодиод, сигнальный шлейф

Для цитирования

Роголёв А. В. Разработка мероприятий по устранению ложного срабатывания телесигнализации системы телемеханики аппаратуры микропроцессорной телемеханики в границах Читинской дистанции электроснабжения Забайкальской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» / А. В. Роголёв, А. Г. Емельянов, С. Н. Андалиев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 59–66. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).59-66

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.09.2021, поступила после рецензирования: 20.09.2021, принята к публикации: 15.10.2021

Mesures for eradication of signaling subsystem false triggering in the AMT telemechanics system within the range of Chita power supply distance of Zabaykalskaya railroad, the subdepartment of Russian Railways

A. V. Rogalyov¹✉, A. G. Emeljanov¹, S. N. Andaliev²

¹Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, the Russian Federation

²Chita power supply distance of Zabaykalskaya power supply directorate – structural subdivision of Transenergo – the subsidiary of JSC «RZSD», Chita, the Russian Federation

✉ a_rogalev@inbox.ru

Abstract

The article is dedicated to the actual problem of the occurrence of an accidental false triggering in the remote signaling subsystem of the AMT telemechanics system. The paths of possible interference into the input / output circuits of the signal conversion modules of the TS of the TU-TS AMT-002 rack located at the EC post of the Tyrgetyuy station located within the Chita power supply distance ECH-1 of the Trans-Baikal Railway are analyzed in detail. In order to research the AMT tele-signaling subsystem operation, a simulation model of the input circuits of the optocouplers of the MST-95 and AMT telemechanics system was developed. An assessment of the degree of circuitry influence upon the sensitivity of the input element of the MST-95 optocoupler module and AMT telemechanics system has been carried out. The simulation model was based on the real parameters of the electronic components of the MST-95 and AMT tracks. Based on the calculations performed in the Multisim 11.0 software package, the responses to the interference effect were determined for four different options of eliminating false alarms. The performed simulation showed that the degree of the input circuits sensitivity of the optocouplers of the MCT-95 and AMT telemechanics systems is significantly influenced by the value of the input impedance of the optocoupler. At the same time, the influence of interference significantly exceeding the nominal values magnitude of the optocoupler actuation voltage, causes the latter's actuation, resulting in the emergence of a false indication of the telesignalization actuation at the ECH. In this case, under the influence of the interference voltage, a voltage is formed in the input circuits of the optocouplers, leading to its abnormal triggering. The increase in the sensitivity of the optocoupler module of the AMT telemechanics system, compared to the MST-95, as designed structurally, was found to be a source of abnormal triggering of the optocoupler phototransistor, both in the presence and the absence of the interference voltage. It was noted that the operating conditions of the existing circuits of the AMT optocoupler module results in a false triggering of the TS subsystem, the latter presenting a significant limitation in organizing energy dispatch control of the configuration of the traction power supply system, which is critically important to ensure a reliable and efficient transportation process within the boundaries of ECH-1 ZabNTE.

Keywords

telesignaling, telemechanics system, interference signal, «dry» sensor-contact, false positive, optron's module sensitivity, LED, signal loop

For citation

Rogalyov A.V., Emeljanov A.G., Andaliev S.N. Razrabotka meropriyatii po ustraneniyu lozhnogo sbratyvaniya telesignalizatsii sistemy telemekhaniki apparatury mikroprotssornoi telemekhaniki v granitsakh Chitinskoj distantsii elektrosnabzheniya Zabaikal'skoi zheleznoi dorogi – filiala OAO «RZhD» [Mesures for eradication of signaling subsystem false triggering in the AMT telemechanics system within the range of Chita power supply distance of Zabaykalskaya railroad, the subdepartment of Russian Railways]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 59–66. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).59-66

Article Info

Received: 10.09.2021, Revised: 20.09.2021, Accepted: 15.10.2021

Введение

При проведении мероприятий по реконструкции систем телемеханики (СТМ) эксплуатируемых участков требуется привести их к единому показателю, так как условия эксплуатации на местах различны: в данном случае – при техническом перевооружении в 2020 году систем автоматики и телемеханики на Читинской дистанции электроснабжения (ЭЧ-1) Забайкальской дирекции энергообеспечения (ЗабНТЭ) структурного предприятия «Трансэнерго» – филиала ОАО РЖД. При замене ранее установленных стоек микроэлектронной СТМ МСТ-95 [1] на аппаратуру микропроцессорной телемеханики (АМТ) [2], выявилась проблема ложного срабатывания подсистемы телесигнализации (ТС), выражающаяся в ложном срабатывании аудио и визуальной индикации сбоя рабочего режима телесигнализации у энергодиспетчера дистанции электроснабжения

(ЭЧЦ), что приводит к нарушению работы всего комплекса диспетчерского управления конфигурацией системы тягового электроснабжения в границах ЭЧ-1. Определение причины нарушения работы ТС и разработка мероприятий по ее ликвидации – актуальная задача, требующая оперативного решения по обеспечению эффективной работы всего телемеханического комплекса [3].

Актуальность проблемы и постановка задачи

В настоящее время на участке Забайкальской железной дороги в границах ЭЧ-1 находятся в эксплуатации несколько типов СТМ: МСТ-95, АСТМУ-А, АМТ и «Торнадо-КП». СТМ МСТ-95 эксплуатируется с 1997 г. и проблем с ТС ранее не было, либо они решались установкой дополнительных промежуточных реле РП-21 железнодорожной автомати-

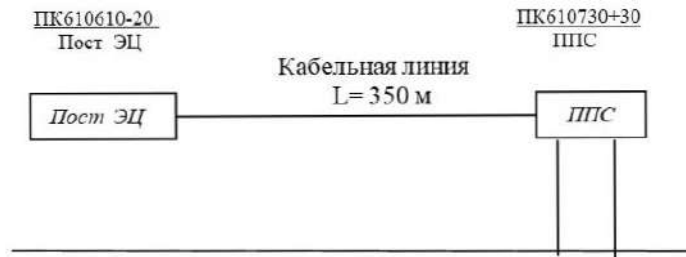


Рис. 1. Выкопировка из схемы питания и секционирования станции Тургутуй
 Fig. 1. Catching from the power scheme and partitioning station Turgutuy

ки, телемеханики и связи между выходом стойки ТМ и объектом телеуправления (ОТУ).

По мере работы ТМ стали нарастать отказы, в том числе и ввиду срока эксплуатации, превышающей паспортную величину – 15 лет [1–3]. При выполнении работ по техническому перевооружению устройств ТМ в границах ЭЧ-1, на энергодиспетчерском участке Хилок – Яблоновая летом 2020 г. была произведена замена системы ТМ МСТ-95 на систему телемеханики АМТ [4].

В процессе пуско-наладочных работ у стойки ТМ АМТ-02 на станции Тургутуй возникла проблема с ТС, приходящей с поста параллельного соединения (ППС) Тургутуй, ЭЧЦ у себя на мнемосхеме пульта дистанционного управления (ДУ) видел то замкнутое, то разомкнутое их положение, т. е. ложную СТС по объектам контролируемых пунктом (КП) СТМ Тургутуй, что ставит под угрозу процесс ДУ работой разъединителей ППС и контактной сети станции. Тем самым нарушается работа ЭЧЦ по оперативному сопровождению системой тягового электроснабжения перевозочного процесса на данном участке Забайкальской железной дороги, что недопустимо в принципе.

Таким образом, надежность функционирования системы ТМ касается не только СТЭ, но и службы движения и локомотивного хозяйства, пассажирских перевозок и критически необходима для обеспечения безопасности, бесперебойности и надежности перевозочного процесса в целом.

Задачей проводимого исследования является определение возможного пути проникновения помехи, оказывающей критическое влияние на работу модулей оптронов МСТ-95 и АМТ для поиска вариантов решения поставленной задачи по исключению ложных срабатываний ТС у ЭЧЦ.

Применяемые методы исследования и построение имитационной модели

Работу ТС системы ТМ МСТ-95 и АМТ характеризует однозначность передаваемых сигналов на пульт ЭЧЦ. Появление ложной ТС вводит ЭЧЦ в заблуждение и может привести к появлению соответствующей ложной команды по ТУ, переключению на объект управления (ОУ), что приведет к со-

зданию неправильной конфигурации СТЭ, и, следовательно, к вероятности аварийной ситуации, как в СТЭ, так и в процессе перевозок.

Натурный эксперимент в подобных условиях с реальными устройствами ТМ в принципе невозможен, остается только имитационное моделирование с использованием современных аппаратно-программных комплексов, к примеру, таких как система компьютерной математики «Multisim» версии 11.0 [5].

На примере участка линии связи системы ТМ ППС – пост электрической централизации (ЭЦ) ЭЧ-1 (рис. 1) была разработана имитационная модель входных / выходных цепей модуля оптронов (МО) стоек ТМ МСТ-95 и АМТ, применяемых на этом участке (рис. 2, 3).

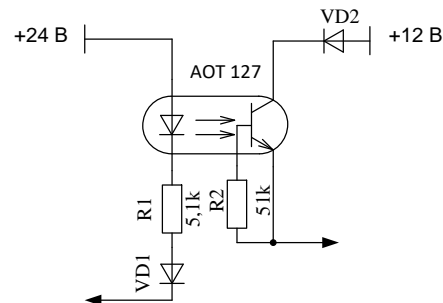


Рис. 2. Схема элемента телесигнализации модуля оптронов

Fig. 2. Remote signaling element scheme of the optocoupler module

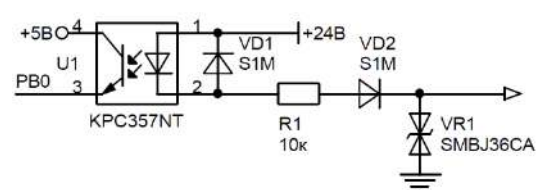


Рис. 3. Схема элемента цепи модуля оптронов подсистемы телесигнализации аппаратуры микропроцессорной телемеханики
 Fig. 3. Scheme of optocoupler module element of the remote signaling subsystem of AMT telemechanics equipment

При выборе параметров схем замещения для реализации элементов имитационной модели были приняты допущения [6–8]. Упрощенная схема замещения линии связи ТМ, состоящая только из поперечных активно-реактивных сопротивлений, а также схема расположения ППС и ЭЦ относительно друг друга и железнодорожных путей, и КС, приведены ниже (рис. 4, 5).

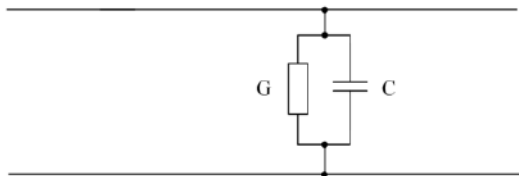


Рис. 4. Эквивалентная схема участка кабельной линии

Fig. 4. Equivalent scheme of the cable line section

Дополнительный учет схемотехники входных / выходных цепей модулей оптронов СТМ МСТ-95 и АМТ дает более широкие возможности имитационного поведения существующего оборудования СТМ на рассматриваемом участке [9, 10], что максимально приближает имитационную модель к реальным условиям эксплуатации СТМ.

Для задания параметров входных / выходных цепей СТМ были взяты принципиальные схемы од-

ного элемента МО СТМ МСТ-95 и АМТ [9, 10] (см. рис. 2, 3). В качестве пороговой чувствительности входной / выходной цепи МО была взята величина из нормативно-справочной литературы –36 В [11]. В качестве модели оптопары модуля МТС выберем оптрон КРС357NT [12], элемент из имеющейся базы программы «Multisim 11.0» – оптрон МОС8101 BASSO. Вместо диодов VD_1 и VD_2 марки S1M, выберем имеющийся в базе программы «Multisim 11.0» аналог 1N3600 [13].

Для того чтобы увидеть влияние помехи на работу оптопары, в качестве нагрузки выходного транзистора вместо процессора, генерирующего сигнал ТС, включим светодиод, срабатывающий, когда ток в нем становится равным реальному току нагрузки. Помеха моделируется в виде генератора переменного напряжения с частотой 50 Гц, установленного на цепи шлейфа линии связи стойки ТМ и МО (рис. 6).

Кнопка S_1 имитирует «сухой» контакт. Получившиеся схемы представлены далее (рис. 7, 8). Путем подбора напряжения генератора, имитирующего помеху, определяется напряжение помехи, при которой загорится светодиод LED_1 при разомкнутом контакте S_1 . Подбор начинается с напряжения 4 В. При напряжении 34 В светодиод LED_1 заморгал при разомкнутом контакте S_1 .

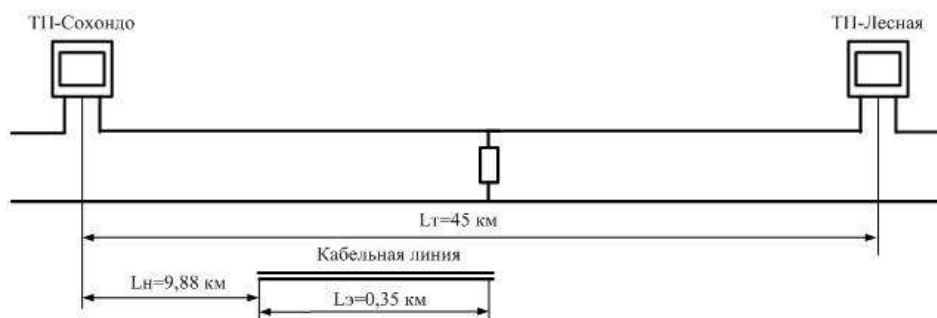


Рис. 5. Схема участка линии связи
Fig. 5. Scheme of the link line network

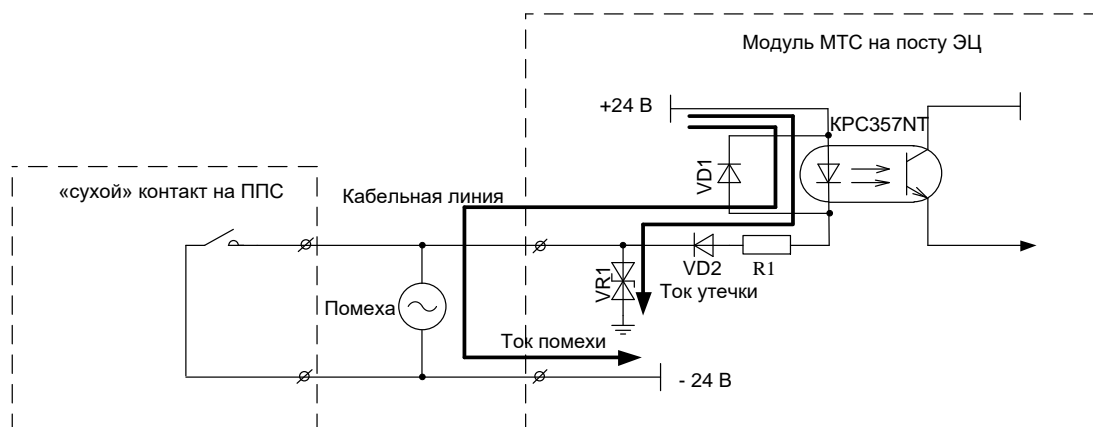


Рис. 6. Схема возможного пути проникновения помехи
Fig. 6. Scheme of the penetration route of interference

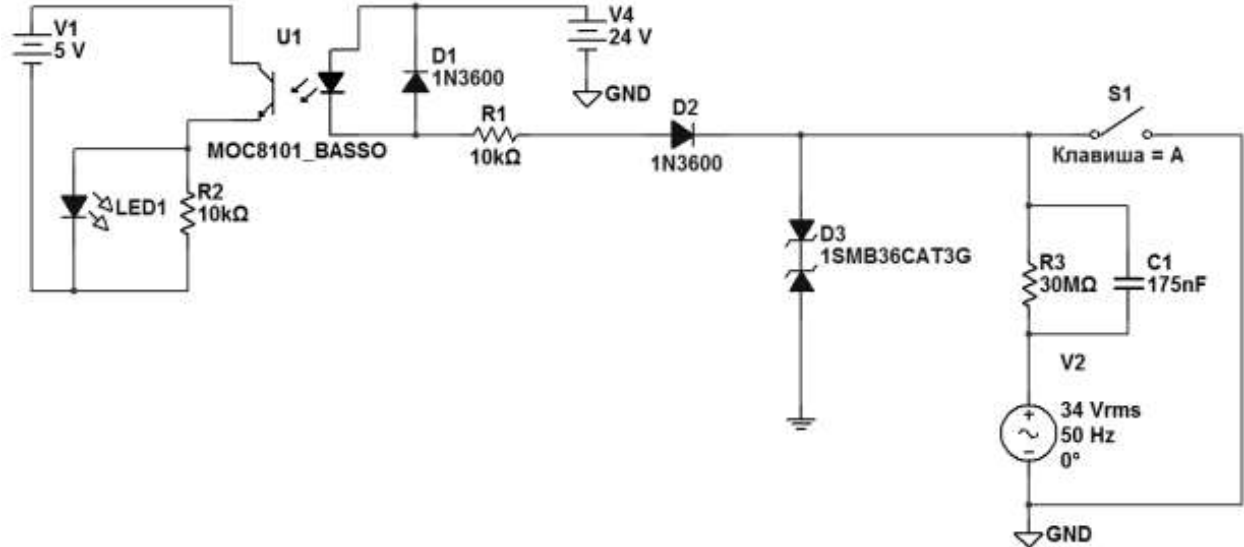


Рис. 7. Модель цепи телесигнализации элемента модуля оптронов аппаратуры микропроцессорной телемеханики

Fig. 7. Model of optocoupler module element of the remote signaling subsystem of AMT telemechanics equipment

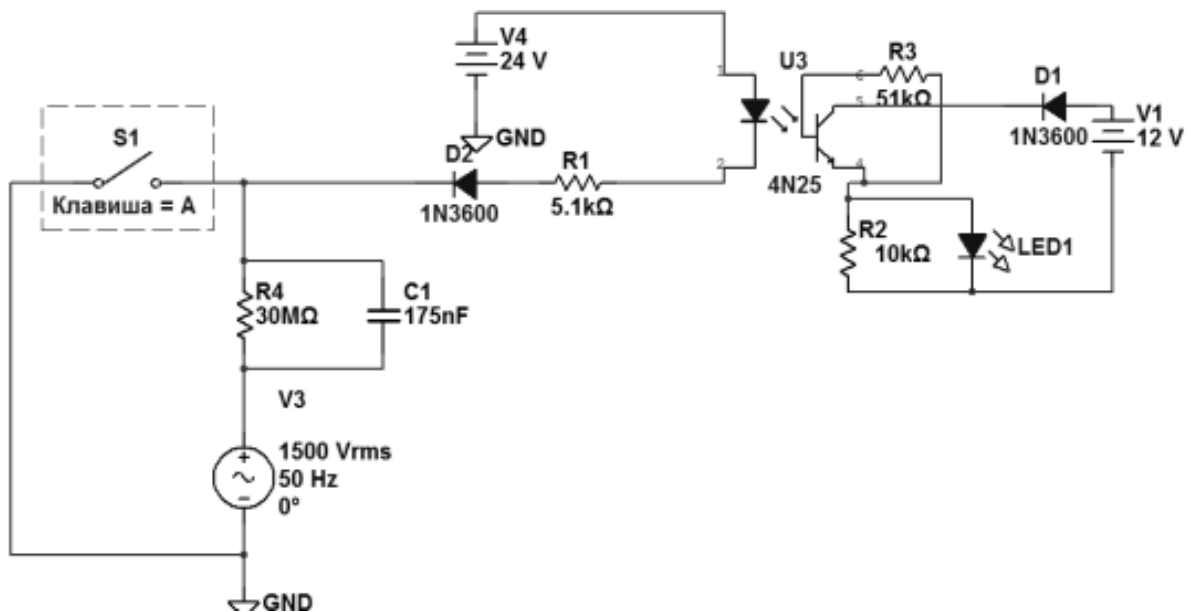


Рис. 8. Модель цепи телесигнализации элемента модуля оптронов MCT-95

Fig. 8. Model of the remote signaling circuit of the optocoupler module element MST-95

В качестве оптопары МО МСТ-95 взят аналог оптрона AOT127 из «Multisim 11.0» – оптрон 4N25. Диоды VD_1 и VD_2 аналогичны диодам МО АМТ. При замыкании контакта S_1 LED_1 светился без моргания, что дает увидеть величину помехи.

Результаты и обсуждение

Важность роли СТМ в сопровождении СТЭ перевозочного процесса за счет повыше-

ния надежности и эффективности ее работы в последнее время подчеркивается отечественными и зарубежными исследователями [14–16], поэтому работа МО при применении защитных мер была рассмотрена более подробно.

Работа имитационной модели ТС МО при изменении номинала конденсатора C_2 от 5 мкФ и выше, до 14 мкФ, представлена в виде кривых напряжений на элементах схемы (рис. 9–11).

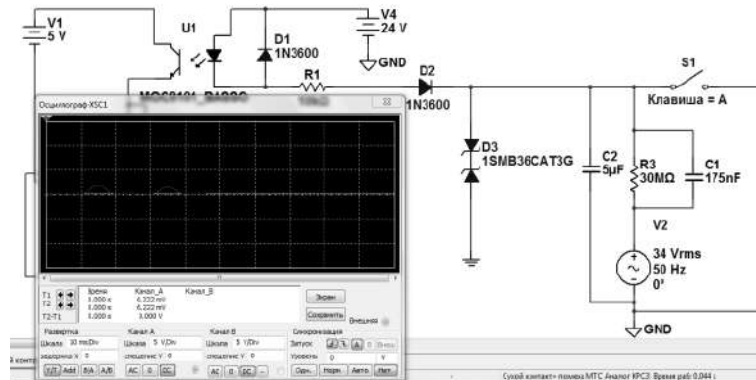


Рис. 9. Осциллограмма с выхода оптрона при номинале C_2 5 мкФ
 Fig. 9. Oscillogram from the optron output at a nominal value of C_2 5 μ F

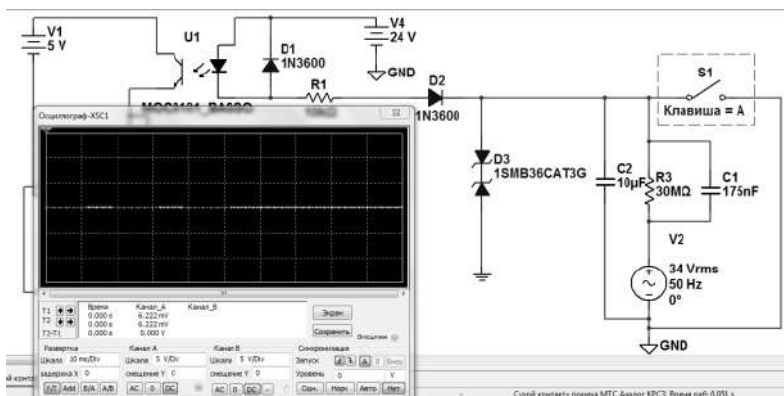


Рис. 10. Осциллограмма с выхода оптрона при номинале C_2 10 мкФ
 Fig. 10. Oscillogram from the optron output at a nominal value of C_2 10 μ F

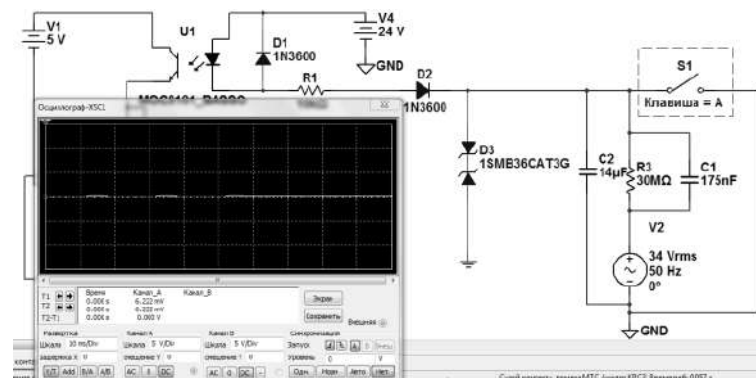


Рис. 11. Осциллограмма с выхода оптрона при номинале C_2 14 мкФ
 Fig. 11. Oscillogram from the optron output at a nominal value of C_2 14 μ F

При номинале емкости C_2 5 мкФ (см. рис. 9) видно, что кривая сигнала помехи имеет существенную величину и это означает, что на выходе схемы МО формируется сигнал логической «единицы», что означает наличие ложной ТС.

При номинале емкости C_2 1 мкФ (см. рис. 10) видно, что кривая сигнала помехи имеет величину, отличную от нуля, и это означает, что на выходе схемы МО формируется неустойчивый сигнал логической «единицы», что дает ненулевую вероятность формирования сигнала ложной ТС.

При номинале емкости C_2 14 мкФ (см. рис. 11) видно, что кривая сигнала генератора помех практически слилась с нулевой абсциссой осциллографа, что дает возможность говорить о компенсации сигнала помехи в достаточной мере, т. е. сигнал ложной ТС отсутствует.

Это дает основание утверждать, что поставленная задача решена. Найденное решение позволит исключить в дальнейшей работе ЭЧЦ ложную ТС.

Заключение

Исходя из полученных данных, можно заключить, что при номинале емкости конденсатора $C_2 = 14$ мкФ, мы добились практического понижения напряжения сигнала помехи. Таким образом, учитывая наличие напряжения помехи в реальном кабеле связи между ППС и ЭЦ станции Тургутуй, можно предложить несколько путей решения данной проблемы [6].

К таким вариантам решения поставленной задачи можно отнести:

1. Учет пороговой чувствительности элементов, входящих в схемотехнику МО, путем замены оптронов в МО АМТ. Однако это нарушает конструктивную целостность оборудования, а, следовательно, гарантийные обязательства заказчика перед поставщиком оборудования ТМ, что категорически неприемлемо.

2. Повышение напряжения питания МО с 24 до 60 В МО АМТ, аналогично, как в системе ТМ «Торнадо-КП» [17]. Практически реализуемо, но требует вмешательства в конструктивную целостность ТМ, нарушения гарантийных обязательств, что также неприемлемо.

3. Замена помехозащищенной линии связи ТМ на помехозащищенную в виде бронированной или экранированной кабельной линии связи, что также рекомендуется [18], но является проблематичным, так как потребует существенных материальных затрат, связанных с проведением целого комплекса строительно-монтажных работ по реконструкции существующей линии связи и достаточно больших сроков нарушения нормального рабочего режима работы ЭЦЦ и перевода с диспетчерского на дистанционное (ручное) управление ОТУ.

4. Применение дополнительных промежуточных реле, с тем чтобы разорвать гальваническую цепь, связывающую датчики – контакты ТС и входные цепи ТС (РП-21). Однако такое решение может быть только временным, так как имеют место случаи отказов ТМ, напрямую связанные с отказами именно самих реле [19]. Кроме того, присутствуют прямые материально-финансовые затраты, связанные как с закупкой комплектующих – достаточно мощных блоков питания реле РП-21, проводников для формирования схемы, что само по себе снижает надежность, так и самих реле, при этом потребуются сертификация [20].

5. Применение простейшего фильтра постоянного тока в виде конденсатора, подключенного к шлейфам ТС вне стойки ТУ-ТС ТМ. Данный вариант дает минимальную стоимость элементной базы (на стойку потребуется всего девять штук), максимальную простоту исполнения и надежности, нет никаких промежуточных элементов, как в блоках промежуточных реле.

Таким образом, авторам представляется целесообразным решением выбор варианта с применением простейшего емкостного фильтра в виде конденсатора, установленного во входной цепи МО, вне стойки ТМ. Тем самым не нарушаются гарантийные обязательства перед заводом-изготовителем аппаратуры, требуется минимальный объем капиталовложений, отсутствует необходимость сертификации, достигаются максимальный уровень надежности, оперативность применения и малый срок монтажных работ. Данный вариант может быть рекомендован к практическому внедрению не только на этом, конкретном участке СТЭ ЭЦ-1, но и по всей протяженности Забайкальской железной дороги, где проходит техническое перевооружение СТМ.

Список литературы

1. Аппаратура микроэлектронной системы телемеханики МСТ-95. М.: МЭЗ ДКРЭ ОАО РЖД, 2001. 14 с.
2. Аппаратура микропроцессорной системы телемеханики АМТ. М.: МЭЗ ДКРЭ ОАО РЖД, 2018. 31 с.
3. Протокол технического Совета ЗаБНТЭ. Приложение 2: приказ № 227 от 23 июля 2020 г. по РРУ ЭЦ-1. Чита: ЗаБНТЭ, 2020. 4 с.
4. Проект технического перевооружения системы телемеханики на участке Хилок – Яблоновая: рабочая документация 6036-0.0-ГЛМ. Чита: ЗаБНТЭ, 2018. 62 с.
5. Multisim – NI. URL: <https://www.ni.com/ru-ru/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim/multisim-education> (дата обращения: 21.07.2021).
6. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость. М.: УМК МПС, 2002. 637 с.
7. Горлов Н.И., Михайловская Ж.А., Первушина Л.В. Методы и средства измерений параметров электрических кабелей связи. Новосибирск: СибГУТИ, 2009. 258 с.
8. Шалягин Д.В., Цыбуля Н.А., Косенко С.С., Волков А.А. и др. Устройства железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Ч. 1. М.: Маршрут, 2006. 587 с.
9. Московский электромеханический завод. URL: <https://mez.ru> (дата обращения: 12.01.2021).
10. Почаевец В.С. Автоматизированные системы управления устройствами электроснабжения железных дорог. М.: Маршрут, 2003. 318 с.
11. ГОСТ Р 33398-2015. Железнодорожная электросвязь. Правила защиты проводной связи от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог постоянного и переменного тока. М.: Стандартинформ, 2015. Т. II. 21 с.
12. ChipDip. URL: <https://www.chipdip.ru> (дата обращения: 9.02.2021).
13. Datasheet California Eastern Labs. URL: www.alldatasheet.com (дата обращения: 9.02.2021).
14. Чернов Ю.А. Электроснабжение электрических железных дорог. М.: УМЦ ЖДТ, 2016. 404с.

15. Володин С.В., Иванов В.В., Просви́ров Ю.Е и др. Электрические железные дороги. М.: УМЦ ЖДТ, 2010. 355 с.
16. Шишов О.В. Современные технологии промышленной автоматизации. Москва, Берлин: Директ-Медиа, 2015. 256 с.
17. Tornado modular systems. URL: <https://tornado.nsk.ru> (дата обращения: 10.01.2021).
18. Харлов Н.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 207 с.
19. Протокол технического Совета ЗабНТЭ//Статистика отказов устройств ТМ ЭЧ-1 за период 2013 – 2020 гг. Чита: ЗабНТЭ, 2020.
20. ГОСТ IEC 60870-4 – 2011. Ч. 4. Технические требования. Устройства и системы телемеханики. М.: Стандартинформ, 2014. 23 с.

References

1. Apparatura mikroelektronnoj sistemy telemekhaniki MST-95 [The equipment of the microelectronic telemechanics system MST-95]. Moscow: MEZ DKRE JSC Russian Railways, 2001. 14 p.
2. Apparatura mikroprotsessornoj sistemy telemekhaniki AMT [The equipment of the microprocessor telemechanics system AMT]. Moscow: MEZ DKRE JSC RZHD, 2018. 31 p.
3. Minutes of the ZabNTE Technical Council. Appendix 2: order No. 227 dated July 23, 2020. according to RRU ECH-1. Chita: ZabNTE, 2020.4 p.
4. Proekt tekhnicheskogo perevoorzheniya sistemy telemekhaniki na uchastke KHilok-YAbulonovaya: rabochaya dokumentatsiya 6036-0.0-TLM [The project of technical re-equipment of the telemechanics system at the Khilok-Yablonovaya section: working documentation 6036-0.0-TLM]. Chita: ZabNTE, 2018. 62 p.
5. Multisim – NI. URL: <https://www.ni.com/ru-ru/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim/multisim-education> (date of access 21.07. 2021).
6. Bader M.P. Elektromagnitnaya sovmestimost'. Moscow: UMK MPS Publ., 2002. 637 p.
7. Gorlov N.I., Mikhailovskaya Zh.A., Pervushina L.V. Metody i sredstva izmerenij parametrov ehlektricheskikh kabelej svyazi [Methods and instruments for measuring the parameters of electrical communication cables]. Novosibirsk: SibGUTI Publ., 2009. 258 p.
8. Shalyagin D.V., Tsybulya N.A., Kosenko S.S., Volkov A.A. etc. Ustrojstva zheleznodorozhnoj avtomatiki, telemekhaniki i svyazi. Ch. 1. [Devices of railway automation, telemechanics and communication. Part 1]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 587 p.
9. Moscow Electromechanical Plant. URL: <https://mez.ru> (date of access: 12.01.2021).
10. Pochaevev V.S. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya ustrojstvami ehlektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Automated control systems for railway power supply devices]. Moscow: Marshrut Publ., 2003. 318 p.
11. GOST R 33398-2015. Zheleznodorozhnaya ehlektrosvyaz'. Pravila zashhity provodnoj svyazi ot vliyaniya tyagovoj seti ehlektrifitsirovannykh zheleznykh dorog postoyannogo i peremennogo toka [Railway telecommunication. Rules for the protection of wire communications from the influence of the traction network of DC and AC electrified railways]. Moscow: Standartinform Publ., 2015. Vol. II. 21 p.
12. ChipDip. URL: <https://www.chipdip.ru> (date of access: 9.02.2021).
13. Datasheet California Eastern Labs. URL: www.alldatasheet.com (date of access: 9.02.2021).
14. Chernov Yu.A. Elektrosnabzhenie ehlektricheskikh zheleznykh dorog [Power supply of electric railways]. Moscow: UMTS ZHDT, 2016. 404p.
15. Volodin S.V., Ivanov V.V., Prosvirov Yu.E. etc. EHlektricheskie zheleznye dorogi [Electric railways]. Moscow: UMTS ZHDT, 2010. 355 p.
16. Shishov O.V. Sovremennye tekhnologii promyshlennoj avtomatizatsii [Modern technologies of industrial automation]. Moscow; Berlin: Direct-Media Publ., 2015. 256 p.
17. Tornado modular systems. URL: <https://tornado.nsk.ru> (date of access: 10.01.2021).
18. Kharlov N.N. Elektromagnitnaya sovmestimost' v ehlektroehnergetike [Electromagnetic compatibility in the electric power industry]. Tomsk: TPU Publ., 2007. 207 p.
19. Minutes of the ZabNTE// Statistika otkazov ustrojstv ТМ ЕНЧ-1 за период 2013 – 2020 гг. [Failure statistics of ТМ ЕНЧ-1 devices for the period 2013 – 2020]. Chita: ZabNTE, 2020.
20. GOST IEC 60870-4 – 2011. Ч. 4 Tekhnicheskie trebovaniya. Ustrojstva i sistemy telemekhaniki [Part 4. Technical requirements. Devices and systems of telemechanics]. Moscow: Standartinform, 2014. 23 p.

Информация об авторах

Рогалёв Андрей Владимирович – канд. пед. наук, доцент кафедры электроснабжения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: a_rogalev@inbox.ru

Емельянов Александр Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: aleksandr-emelja@mail.ru

Андалиев Сергей Николаевич – электромеханик ТУ-ДУ, Читинская дистанция электроснабжения ЭЧ-1, Забайкальская дирекция по энергообеспечению СП «Трансэнерго» – филиал ОАО Российские железные дороги, г. Чита, e-mail: s.andaliev@mail.ru

Information about the authors

Andrey V. Rogalyov – Ph.D. in Ped. Science, Associate Professor of the Subdepartment of Power Supply, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: a_rogalev@inbox.ru

Alexander G. Emeljanov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment Electricity Supply, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: aleksandr-emelja@mail.ru

Sergey N. Andaliev – electro-mechanic TU-DU, Chita distance Power supply ECH-1, Trans-Baikal Directorate for Power Supply JV “Transenergo” – branch of the Russian Railways, Chita, e-mail: s.andaliev@mail.ru

Анализ развития дефектов на поверхности катания грузовых вагонов в пути следования от места погрузки до места выгрузки

Д. О. Емельянов✉, Л. В. Мартыненко

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

✉ emelyanovdenis1995@mail.ru

Резюме

В настоящее время на сети железных дорог России и, в частности Восточно-Сибирской железной дороге, остро стоит вопрос качества эксплуатируемого подвижного состава. Увеличился рост количества отцепок вагонов, причиной которых является неудовлетворительное состояние пути и вагона в целом, что требует поиска оптимальных решений данных проблем. Рассуждая на актуальную тему, несомненно, необходимо затронуть вопросы современных стратегий и тенденций развития железнодорожного транспорта и вагонного парка, внедрения современных технологий и технологического оборудования. В результате детального рассмотрения поставленных вопросов, причин и следствий возникновения тех или иных факторов, отправной точкой будет являться углубленный анализ системы взаимодействия «колесо – рельс». Данный анализ позволит объективно указать на конкретные причины существующих проблем в области эксплуатации, описать возникающие явления с достаточной степенью обоснования, предложить прогрессивные актуальные методы решения и обсудить возможные перспективы развития железнодорожной отрасли. Обратившись к статистике по отказам за последние три года, можно проследить рост неисправностей, связанных с дефектами поверхности катания колес. И, действительно, увеличение скоростей движения подвижного состава, рост объемов перевозимых грузов привели к повышению интенсивности его эксплуатации. Следствием этого стало увеличение нагрузок на основные узлы подвижного состава, повышение интенсивности износа деталей.

Ключевые слова

инновационный вагон, интенсивный износ, дефект, безопасность движения, подвижной состав, железнодорожная инфраструктура, система «колесо – рельс», эксплуатация, статистика

Для цитирования

Емельянов Д. О. Анализ развития дефектов на поверхности катания грузовых вагонов в пути следования от места погрузки до места выгрузки / Д. О. Емельянов, Л. В. Мартыненко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 67–75. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).67-75

Информация о статье

поступила в редакцию: 26.08.2021, поступила после рецензирования: 03.09.2021, принята к публикации: 09.09.2021

Analysis of the defect formation on the rolling surface of freight cars en route from loading to unloading site

D. O. Emelyanov✉, L. V. Martynenko

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ emelyanovdenis1995@mail.ru

Abstract

Currently, the issue of the operated rolling stock quality is urgent in the Russian railway network and the VSZHD, in particular. The number of uncoupling cars has increased, due to the unsatisfactory condition of the track and car in general, requiring the search for optimal solutions to these problems. Discussing the current topic, it is undoubtedly necessary to touch upon the issues of modern strategies and trends in the development of railway transport and the carriage fleet, the introduction of modern technologies and technological equipment. As a result of a detailed consideration of these issues, the causes and consequences of the occurrence of certain factors, the starting point will be an in-depth analysis of the wheel-rail interaction system. This analysis will allow to objectively indicate the specific causes of existing problems in the field of operation, describe emerging phenomena sufficiently substantiated, offer progressive topical solutions and discuss possible prospects for the development of the industry. Referring to the statistics on failures over the past 3 years, it is possible to trace the growth of malfunctions associated with defects in the rolling surface of the wheels. And indeed, the speed increase of the rolling stock, the increase in the volume and quantity of transported goods led to an increase in the intensity of the rolling stock operation. As a result, there was an increase in loads upon the main components of the rolling stock, an increase in the parts wearing intensity.

Keywords

innovation car, intense wearing, defect, motion safety, rolling stock, railroad infrastructure, "wheel-rail" system, operation, statistics

For citation

Emelyanov D. O., Martynenko L. V. Analiz razvitiya defektov na poverkhnosti kataniya грузовых вагонов в пути следования от места погрузки до места выгрузки [Analysis of the defect formation on the rolling surface of freight cars en route from loading to unloading site]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 67–75. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).67-75

Article Info

Received: 26.08.2021, Revised: 03.09.2021, Accepted: 09.09.2021

Введение

Взаимодействие системы «колесо – рельс» является основной причиной развития дефектов, так как колесо и рельс могут работать абсолютно по-разному, и причины развития дефектов на них в процессе движения ведут к нарушениям работы узлов и деталей подвижного состава, к выходу их из строя, а в худшем случае к сходу состава, что оборачивается многомиллионными потерями для всей отрасли железнодорожного транспорта.

Взаимодействие пути и подвижного состава является предметом детального рассмотрения комплекса различных научных дисциплин, всесторонне исследующих механические процессы, сосредоточенные в железнодорожном подвижном составе и в железнодорожном пути при оказании ими воздействия друг на друга [1]. Это взаимодействие – основной физический процесс при движении вагонов [2].

В конце 1980-х гг. на железных дорогах России увеличилась интенсивность бокового износа рельсов, а также износ гребней колес [3]. Интенсивный износ колес и рельсов сопровождался заметным ростом числа дефектных рельсов в пути, бокового износа рельса, вследствие чего прослеживался необратимый рост количества изломов рельсов и колес подвижного состава при их контактом взаимодействии (рис. 1) [4]. Это вело к крайне негативным последствиям в сфере безопасности движения поездов в целом.

Рассмотрим основные виды дефектов:

- 21 (красный) – наличие поперечных трещин из-за низкого качества (в частности, прочности) стали, использованной для производства металлоконструкции;
- 17 (синий) – отслоение и/или выкрашивание металла на головке прокатного изделия, наличие

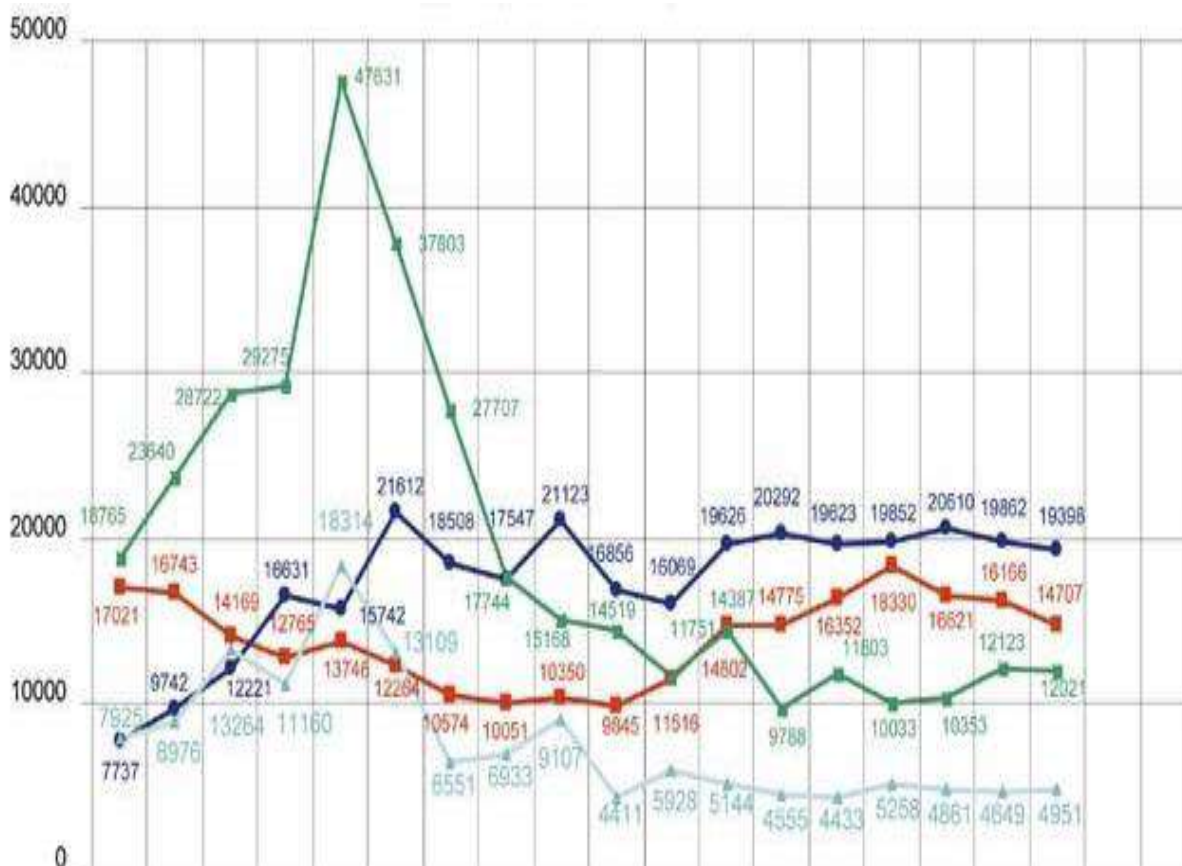


Рис. 1. Количество дефектных рельсов на сети железных дорог России

Fig. 1. Number of defects in the railroad network in Russia

изъянов в стыках;

– 44 (зеленый) – износ верхней части (боковой, вертикальный, неравномерный) и/или прочие пластические деформации, возникает по причине чрезмерной нагрузки на путь или из-за того, что подвижной состав не соответствует требованиям к эксплуатации;

– 41 (серый) – смятие, износ верхней части (боковой, вертикальный, неравномерный) и/или другие деформации из-за низкого качества (в частности, прочности) стали, использованной для производства металлоконструкции.

Как было позже установлено в ходе исследований, основная причина интенсивного износа в системе «колесо – рельс» связана со сверхнормативным сужением или уширением рельсовой колеи [5]. Исследования, проведенные по сети железных дорог, дают основания считать, что большинство дефектов возникает в головке рельса и являются дефектами контактно-усталостного происхождения [6].

В настоящее время рельс страдает от бокового износа, ранее повышенный боковой износ рельсов встречался в основном на кривых малого радиуса до 650 м, в настоящее время прослеживается и в кривых

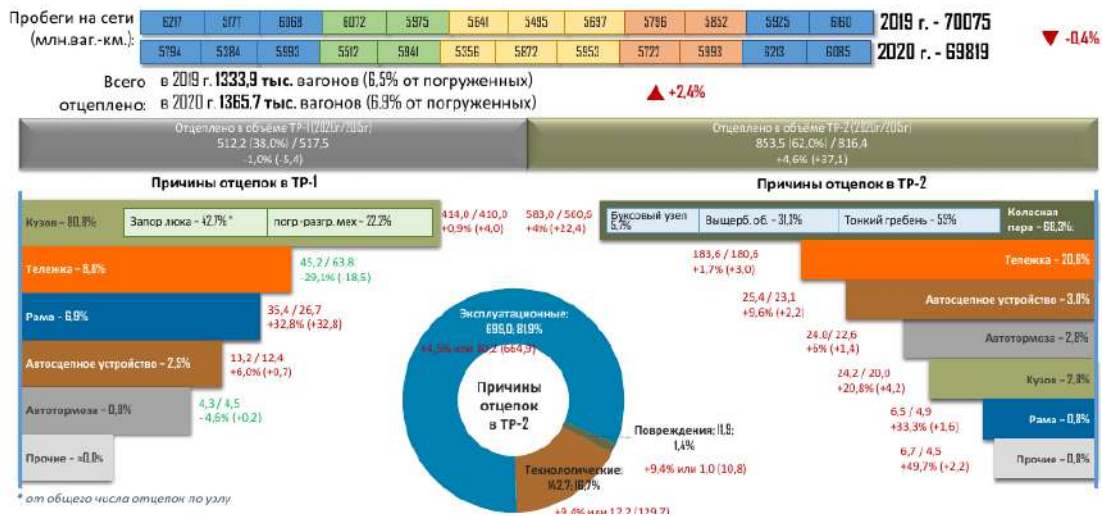


Рис. 2. Причины отцепок грузовых вагонов во внеплановый ремонт TP-1, TP-2 за 12 мес. 2020 г. (тыс. вагонов)

Fig. 2. Reasons for freight car uncoupling during the unscheduled repairs TP-1 and TP-2 within 12 months of 2020 (thousands cars)

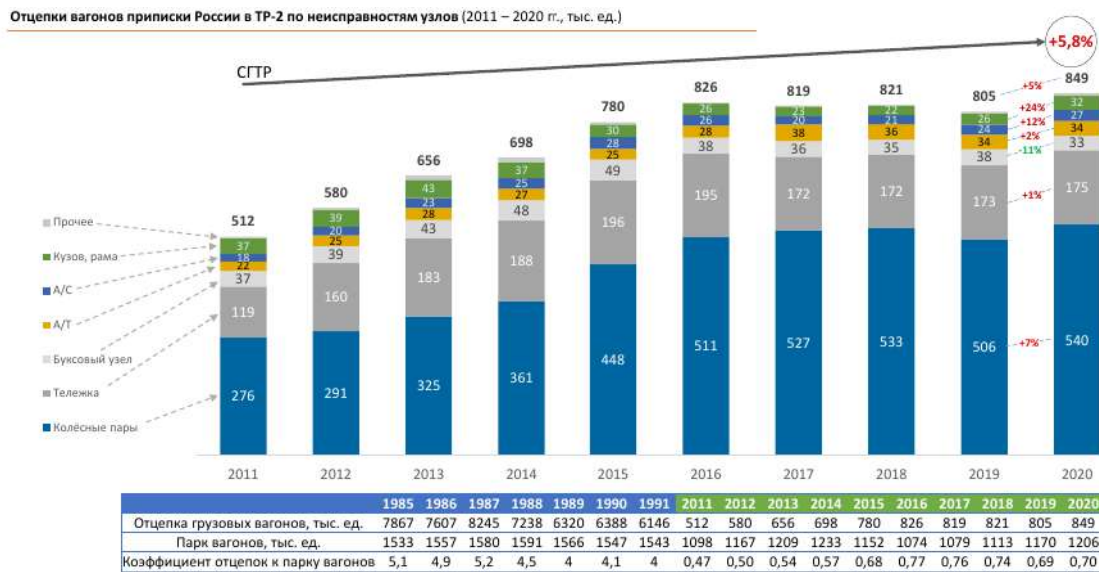


Рис. 3. Отцепки вагонов приписки России в TP-2 по неисправностям узлов за отчетный период

Fig. 3. Uncoupling of Russia home cars in TP-2 due to node malfunction within the reference period

радиусом более 1 000 м, а иногда и до 2 000 м [7]. Боковой износ появился и на прямых участках пути, что свидетельствует об изменении характера взаимодействия колеса и рельса, что связано не только с изменением формы колеса, но и угла набегания гребня колеса на рельс [8]. Особенно это заметно при движении по кривым участкам пути порожними вагонами. Отсюда следует, что взаимодействие пути и подвижного состава в груженом и порожнем состоянии происходит по-разному, значит углы набегания колеса на рельс могут варьироваться [9]. Задача состоит в том, чтобы уменьшить углы набегания, для этого необходимо внести дополнительное нормирование отводов ширины колеи.

Данную проблему нужно решать двумя способами: изъять рельсы при достижении бокового износа 8–10 мм, либо усовершенствовать ходовые части вагонов, а также внести изменения при проектировании кузова и крепления его на тележки [10]. Но если при первом способе увеличится в 2–2,5 раза объем смены рельсов, что при детальном рассмотрении является тупиковым, то второй способ позволяет кардинально решить проблему. Правда для этого потребуются немало материальных средств и временных ресурсов.

Тем не менее не исключены и другие решения. Если одна сторона проблемы кроется непосредственно в пути, то обратная сторона этой же проблемы – это ходовая часть вагона, а именно, колесная пара [11]. Статистика отцепок грузовых вагонов за последние годы по основным узлам четко демонстрирует преимущество колесных пар, как проблемного узла грузового вагона (рис. 2). Из этой же статистики можно сделать вывод, что основная причина большинства дефектов колесной пары кроется в процессе

эксплуатации грузового подвижного состава.

Неблагоприятную тенденцию подтверждает и статистика отцепок в ремонт по основным узлам, взятая за более продолжительный период (рис. 3).

Очевидно, что напрашивается детальное рассмотрение статистики по дефектам колесных пар, которые привели к отцепкам вагонов. Это позволит сделать более точные выводы и заключения.

Из представленной статистики мы видим, что в последние годы сохраняется высокая интенсивность эксплуатации грузового подвижного состава, что уже является фактором, предрасполагающим к развитию усталостного износа. Основными же дефектами, развивающимися в процессе эксплуатации, являются тонкий гребень и выщербины, раковины обода колеса (рис. 4).

Обращаясь непосредственно к развитию дефектов колесных пар, в частности колеса, следует учитывать ряд факторов [12], а именно: профиль и кривизну пути, скорость движения подвижного состава, массу состава, профиль рельса и колеса. Все это напрямую влияет на восприятие колесной парой осевых и радиальных нагрузок. Также необходимо учитывать статическую и динамическую составляющую этих нагрузок [13]. В результате построения математической модели системы «колесо – рельс» и произведения расчетов с учетом перечисленных факторов получим пятно контакта (рис. 5).

На основе этого напрашивается очевидный вывод, что за счет предельно малой площади контакта и максимальных нагрузок в этой области, многократно увеличивающихся при прохождении кривых на малых скоростях при максимально допустимых массах состава, происходит интенсивный усталостный износ, приводящий к развитию дефектов в

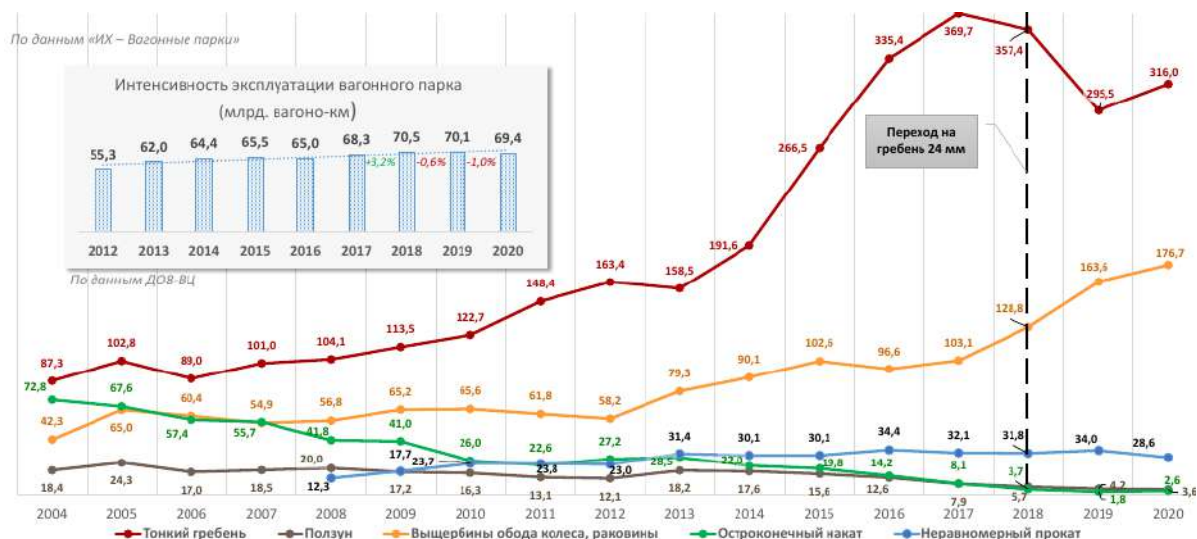


Рис. 4. Динамика отцепок в TP-2 вагонов в России

по наиболее массовым видам неисправностей колесных пар, тыс. ед.

Fig. 4. Uncoupling dynamics of cars in TP-2 in Russia due to the most common defects of wheelsets, thousand units

процессе эксплуатации [14]. Также необходимо учитывать наличие развившихся дефектов на поверхности катания колеса, например, ползуна, выщербин, что ведет к увеличению динамических нагрузок и воздействий примерно в 1,5–2 раза [15].

На величину и распределение контактных напряжений большое влияние оказывают профили колеса и рельса, а также характер контакта: одно-

точечный или двухточечный (рис. 6) [16, 17]. При конформном профиле, размер площади контакта увеличивается, что приводит к уменьшению уровня контактных напряжений по сравнению с неконформными профилями. Конформный профиль – это профиль обода колеса, который от опорной поверхности катания до рабочей поверхности гребня подобен профилю рельса от опорной поверхности каче-

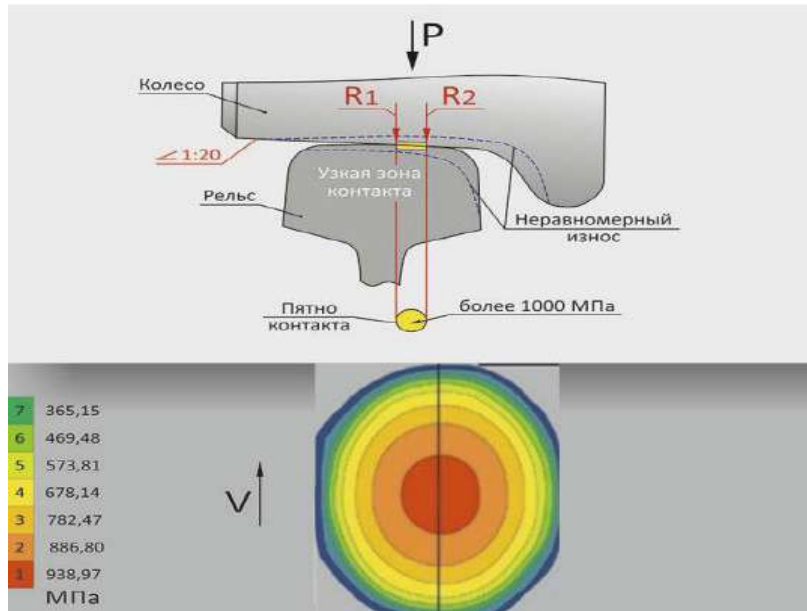


Рис. 5. Пятно контакта между колесом и рельсом

Fig. 5. Wheel-rail contact spot

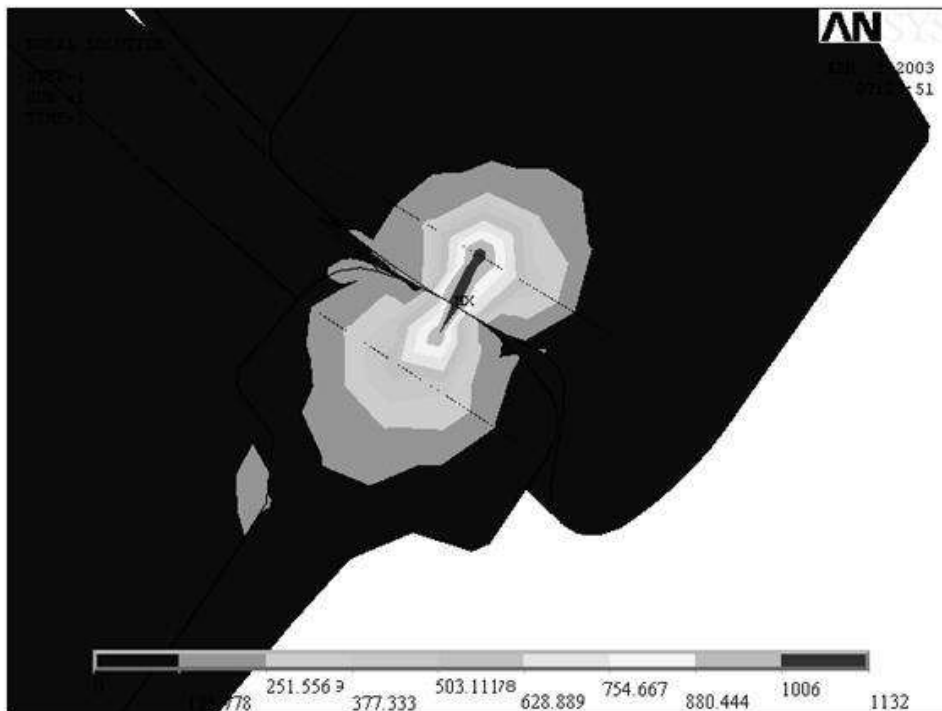


Рис. 6. Контактное напряжение в системе «колесо-рельс»

Fig. 6. Contact stress in the system “wheel-rail”

ния до боковой поверхности рельса. В данный момент подобное решение проблемы выглядит весьма прогрессивно, хоть и имеет определенные недостатки и сложности.

С одной стороны, изменив путевое строение, под уклонку рельсов и согласовав профиль рельса с поверхностью катания колеса, мы изменим структурное представление об усталостном износе в системе взаимодействия между колесом и рельсом. В перспективе данное решение при достаточном обосновании выглядит предпочтительным с научной точки зрения. С другой стороны, данное решение ведет к огромным финансовым затратам, принятию кардинальных мер по реорганизации верхнего строения пути, пересмотру технологий обслуживания пути и колесных пар, стандартов и норм геометрических размеров рельса и колеса, проведению многочисленных испытаний с последующим обоснованием технических решений.

Результат проведения комплексной оценки влияния множества изученных факторов на процессы износов в системе взаимодействия «колесо – рельс» нашел отражение в полученных графических и табличных данных, наглядно демонстрирующих влияние так называемого «фактора износа» непосредственно на сам процесс. Полученные зависимо-

сти представлены на рис. 7.

В данный момент имеет место одно из перспективных решений проблемы, обращенное не столько к технической стороне проблемы дефектов колесных пар, сколько к общему экономическому эффекту, реализуемому грузовым вагоном. Все большую известность приобретает понятие инновационный вагон. Инновационный вагон – тележкой 18-9855, позволяет увеличить ресурс ходовой части до 1 млн км, а также обеспечить низкую динамику при высокой нагрузке и уменьшенное сопротивление движению. Кроме того, кузов полувагона на этой тележке другой формы, за счет чего повысилась загрузка вагона и распределение сил на тележку. На этих моделях применяются литая консоль и интегрированная тормозная система. Все это позволило повысить надежность вагонов и уменьшить количество отцепок в ремонт, тем не менее, несмотря на новизну всех технических решений в области вагоностроения, основным критерием так называемой инновационности вагонов новых поколений является их экономическая эффективность, т. е. применение дорогих износостойких, легких и прочных материалов, увеличивающих срок службы вагонов, их скорость движения и максимальную загрузку не позволит относить вагон к разряду инно-

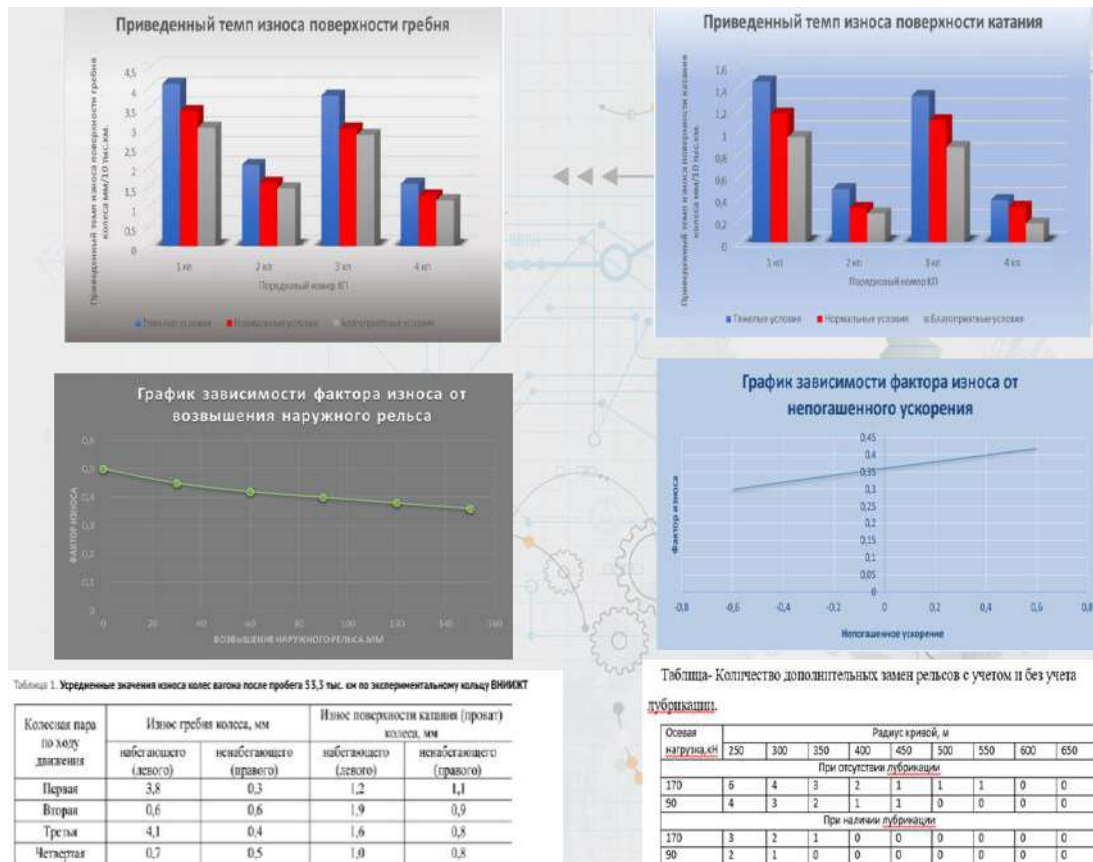


Рис. 7. Факторы износа колеса в ходе эксплуатации
Fig. 7. Factors of the wheel wear during the operation

вагонных, если его экономическая эффективность не вырастет. Именно это и является в данном направлении одним из главных вопросов, так как экономическая эффективность данных вагонов теряется за счет стоимости изготовления и обслуживания вагона, больших финансовых затрат на стадии введения вагона в эксплуатацию. Из протокола заседания Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»: «... грузовой вагон нового поколения – это грузовой вагон, дающий при массовом внедрении значимый экономический эффект для всех участников перевозочного процесса по сравнению с массовым вагоном-аналогом за счет применения технических решений, отвечающих достигнутому к настоящему моменту уровню техники...».

Эксплуатация инновационных вагонов оказалась позитивной, основной плюс – это увеличение грузоподъемности вагона и увеличение грузопотока на 7–8 %. Опыт эксплуатации таких вагонов на данном этапе дает высокие эксплуатационные показатели скорости и сроки доставки груза, что важно при дальних направлениях и поставках через морские порты.

Существующее на данном этапе состояние железнодорожной инфраструктуры остается главным фактором, сдерживающим развитие этого перспективного направления в вагоностроении [18]. Основная проблема при эксплуатации инновационных грузовых вагонов состоит в отсутствии эффективного сервиса по оснащению подвижного состава запасными деталями. Из этого следуют проблемы, не позволяющие в полной мере реализовать преимущества, заложенные в фундамент понятия инновационного вагона, на сегодняшний день мы видим, что если инновационный грузовой вагон отправляется в текущий отцепочный ремонт, то простой такого вагона на 36 % выше, чем у любого типового вагона. И связано это только с тем, что мы не имеем возможности обеспечивать ремонт такого вагона из-

за отсутствия запасных частей в необходимом количестве или из-за задержек поставок.

Проблема же развития дефектов колесных пар не миновала и инновационные вагоны. При всей новизне конструкции основных узлов вагона, внедрении новых материалов и повышению экономической эффективности вагона в целом, неприятные тенденции развития тонкого гребня колеса, выщербин на поверхности катания колеса и бокового износа рельса сохранились. Поэтому система взаимодействия «колесо – рельс» требует дальнейшего углубленного анализа, многочисленных опытов и исследований, а также конкретных технических решений.

Заключение

Фундаментальными факторами, влияющими на интенсивность бокового износа рельсов, а также колес подвижного состава, являются горный рельеф местности с множеством кривых малого радиуса, большая грузонапряженность, повышенные осевые нагрузки, особенно у инновационных вагонов. Проанализировав исследования о боковом износе, точка контакта, где происходит набегание колеса на рельс, является самым слабым местом, большой угол набегания – основная причина бокового износа. Повышенная интенсивность бокового износа рельса – это не только горный рельеф местности, но и угол набегания гребня колеса на рельс, который зависит от многих факторов, особенно от контакта колеса с рельсом, соответственно, это связано и с техническим состоянием пути и вагона в целом. Данное заключение говорит о том, что любая неисправность в системе «колесо – рельс» увеличивает угол набегания колеса и может привести к сходу.

Список литературы

1. Быков Б.В. Конструкция тележек грузовых и пассажирских вагонов : учеб. пособие. М. : Маршрут, 2004. 36 с. : ил.
2. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М. : Транспорт, 1986. 560 с.
3. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1991. 860 с.
4. Грачева Л.О., Певзнер В.О., Анисимов П.С. Показатели динамики и воздействия на путь грузовых четырехосных вагонов при различных износах тележек и отступлениях от норм содержания в прямых участках пути // Сб. науч. тр. ВНИИЖТ. Вып. 549. М., 1976. С. 4–25.
5. Доронин И.С. Расчет шейки оси колесной пары на продольную нагрузку // Вестник ВНИИЖТ. 1978. № 5. С. 33–34.
6. Ершков О.П. Расчет рельса на действие боковых сил в кривых // Тр. ЦНИИ МПС. М., 1960. Вып. 192. С. 5–58.
7. Иванова В.Ю. МДК 02.01 Организация работы и управление подразделением организации (вагоны) (раздел 3) (тема 3.3) : фонд оценочных средств. М. : УМЦ ЖДТ, 2020. 40 с.
8. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотрику вагонов) № 808-2017-ПКБ-ЦТ : утв. Советом по железнодорожному транспорту Государств - участников Содружества : от 21-22 мая 2009 г. № 50. Введ. 01.09.2009.
9. Карпушенко Н.И., Величко Д.В., Бобовникова Н.А. Влияние ширины колеи и состояния ходовых частей подвижного состава на интенсивность износов // КиберЛенинка : сайт. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-shiriny-kolei-i-sostoyaniya-hodovyh-chastey-podvizhnogo-sostava-na-intensivnost-iznosov/viewer> (Дата обращения 22.08.2021).

10. Кудрявцева Н.Н. Динамические нагрузки ходовых частей грузовых вагонов // Тр. / ВНИИЖТ. М., 1977. Вып. 572. 144 с.
11. Лукин В.В., Анисимов П.С., Федосеев Ю.П. Вагоны. Общий курс. М. : Маршрут, 2004. 424 с.
12. Пухов И.В. Между колесом и рельсом // Гудок. 2013. 22 нояб. (№ 207 (26346)). Электрон. версия. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1393921> (Дата обращения 18.09.2021).
13. Ромен Ю.С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее: методы расчета и испытаний. М. : ВМГ-Принт., 2014. 208 с.
14. Ромен Ю.С., Мугинштейн Л.А., Неверова Л.И. Влияние продольных сил в поездах на опасность схода вагона в зависимости от их загрузки // КиберЛенинка : сайт. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-prodolnyh-sil-v-poezdah-na-opasnost-shoda-vagonov-v-zavisimosti-ot-ih-zagruzki/viewer> (Дата обращения 01.04.2021).
15. Ромен Ю.С., Певзнер В.О. Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения. М. : Интекст, 2013. 224 с.
16. Рудановский В.М. Методика определения причин сходов подвижного состава в условиях неопределённости // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 4. С. 10–15.
17. Вагоны. Конструкция, теория и расчет / под ред. Л.А. Шадур. М. : Транспорт, 1980. 439 с.
18. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь. М. : Транспорт, 1987. 479 с.

References

1. Bykov B.V. Konstruktsiya telezhek gruzovykh i passazhirskikh vagonov : ucheb. posobiye [Design of trucks and passenger cars: an Illustrated textbook]. Moscow: Route Publ., 2004. 36 p.
2. Verigo M.F., Kogan A.Ya. Vzaimodeystviye puti i podvizhnogo sostava [Interaction of the track and rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1986. 560 p.
3. Vershinsky S.V., Danilov V.N., Khusidov V.D. Dinamika vagona. 3-ye izd., pererab. i dop. [Dynamics of the car ed. 3]. Moscow: Transport Publ., 1991. 360 p.
4. Gracheva L.A., Pevzner V.O., Anisimov P.C. Pokazateli dinamiki i vozdeystviya na put' gruzovykh chetyrekhosnykh vagonov pri razlichnykh iznosakh telezhek i otstupleniyakh ot norm soderzhaniya v pryamykh uchastkakh puti [Performance Indicators and impact on the way cargo four-axle cars with different wears trucks and derogations from norms in the straight sections of the path]. *Sb. nauch. tr. VNIIZHT [Proc. scientific. Tr. VNIIZHT]*. Moscow, 1976, Vol. 549, pp. 4–25.
5. Doronin I.S. Raschet sheyki osi kolesnoy pary na prodol'nyuyu nagruzku [Calculation of the wheel pair axle neck for longitudinal load]. *Vestnik VNIIZHT [Bulletin VNIIZHT]*, 1978, pp. 33–34.
6. Yershkov O.P. Raschet rel'sa na deystviye bokovykh sil v krivykh [Calculation of the rail on the action of side forces in curves]. *Tr. TSNII MPs [Tr. TSNII MPs]*. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1960, Issue 192, pp. 5–58.
7. Ivanova V.Yu. MDK 02.01 Organizatsiya raboty i upravleniye podrazdeleniyem organizatsii (vagony) (razdel 3) (tema 3.3): fond otsenochnykh sredstv [MDK 02.01 Organization of work and management of the organization's division (wagons) (section 3) (topic 3.3): Fund of evaluation funds]. Moscow: UMTS ZHDT, 2020. 40 p.
8. Instruksiya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu vagonov v ekspluatatsii (instruksiya osmotrshchiku vagonov) № 808-2017-PKB-TST [Instructions for maintenance of cars in operation (instructions to the car inspector) No. 808-2017-PKB-CT].
9. Karpushchenko N.I., Velichko D.V., Bobovnikova N.A. Vliyaniye shiriny kolei i sostoyaniya khodovykh chastei podvizhnogo sostava na intensivnost' iznosov [Influence of track width and condition of running parts of rolling stock on the intensity of wear]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-shiriny-kolei-i-sostoyaniya-hodovykh-chastei-podvizhnogo-sostava-na-intensivnost-iznosov/viewer>. Accessed: August 22, 2021.
10. Kudryavtseva N.N. Dinamicheskiye nagruzki khodovykh chastei gruzovykh vagonov [Dynamic loads of running parts of freight cars]. *Tr. VNIIZHT*. Moscow: Transport Publ., 1977. Issue 572. 144 p.
11. Lukin V.V., Anisimov P.S., Fedoseev Yu.P. Vagony. Obshchiy kurs [Wagons. General course]. Moscow: Route, 2004. 424 p.
12. Pukhov I.V. Mezhdru kolesom i rel'som [Between the wheel and the rail]. *Gudok [Beep]*. Issue 207 (26346). URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1393921> Accessed: September 18, 2021.
13. Romen Yu.S. Dinamika zheleznodorozhnogo ekipazha v rel'sovoy koleye: metody rascheta i ispytaniy [Dynamics of the railway crew in the rail track: methods of calculation and testing]. Moscow: VMG-Print., 2014. 208 p.
14. Romen Yu.S., Muginshtein L.A., Neverova L.I. Vliyaniye prodol'nykh sil v poyezdakh na opasnost' skhoda vagona v zavisimosti ot ikh zagruzki [Influence of longitudinal forces in trains on the danger of car derailment depending on their loading]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-prodolnyh-sil-v-poezdah-na-opasnost-shoda-vagonov-v-zavisimosti-ot-ih-zagruzki/viewer> Accessed: April 01, 2021.
15. Romen Yu.S., Pevzner V.O. Osnovy razrabotki normativov soderzhaniya puti i ustanovleniya skorostey dvizheniya [Bases of development of standards of the way maintenance and setting of traffic speeds]. Moscow: Intext Publ., 2013. 224 p.
16. Rudanovsky V. M. Metodika opredeleniya prichin skhodov podvizhnogo sostava v usloviyakh neopredelonnostey [Method for determining the causes of rolling stock gatherings in conditions of uncertainty]. *Vestnik VNIIZHT [Bulletin VNIIZHT]*, 2011, No. 4, pp. 10–15.
17. Vagony. Konstruktsiya, teoriya i raschet. Pod red. L.A. Shadur [Wagons. Construction, theory and calculation. In Shadur L.A. (ed.)]. Moscow: Transport, 1980. 439 p.
18. Shakhunyats G.M. Zheleznodorozhnyy put' [Railway track]. Moscow: Transport, 1987. 479 p.

Информация об авторах

Емельянов Денис Олегович – аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: emelyanovdenis1995@mail.ru

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

Information about the authors

Denis O. Emelyanov – Ph.D. student of the Subdepartment of Rail Cars and Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: emelyanovdenis1995@mail.ru

Lyubov V. Martynenko – senior lecturer of the Subdepartment Rail Cars and Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru

Управление рисками в организации движения поездов

П. С. Бурдяк✉

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Российская Федерация

✉ burdyakps@mail.ru

Резюме

В статье рассматривается современный подход к получению информации от событий, сопровождающих перевозочный процесс. Существующий подход к выявлению причин отказов и технологических нарушений имеет направленность на установление причин возникновения сбоя и оценку последствий, вызванных событием. Такой подход продиктован постоянным наличием сбоев и необходимостью определения виновного подразделения с дальнейшей проработкой причин и предупреждения таких событий. Современные технологии сбора и обработки данных с использованием искусственного интеллекта уже реализуются во многих высокотехнологичных компаниях мира. Целью этих технологий является получение большого объема данных с целью их обработки и выявления ранее неизвестных зависимостей. Использование этих зависимостей в перевозочном процессе позволит сделать его более совершенным. Аналогичный подход был реализован в 70–80 гг. прошлого века, когда активно началось внедрение автоматизированных систем управления в железнодорожном транспорте. Совершенствование технологии перевозочного процесса позволило сократить ограничения в развитии инфраструктуры железнодорожного транспорта по многим направлениям. На сегодняшний день использование результатов обработки больших данных является продолжением уже реализованной технологии совершенствования перевозочного процесса. Предложение такой услуги другим участникам рынка и использование «своих» и «чужих» данных позволит обработать больше информации и получить лидерство в этой технологии. Доминирование в железнодорожной отрасли на основе современных технологий позволит компании надолго закрепиться в лидерах рынка, в том числе мирового.

Ключевые слова

управление рисками, перевозочный процесс, движение поездов, искусственный интеллект, большие данные, график движения поездов

Для цитирования

Бурдяк П. С. Управление рисками в организации движения поездов / П. С. Бурдяк // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 76–82. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).76-82

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.08.2021, поступила после рецензирования: 20.08.2021, принята к публикации: 03.09.2021

Risk management in train operation

P. S. Burdyak✉

Siberian State University, Novosibirsk, the Russian Federation

✉ burdyakps@mail.ru

Abstract

A modern approach to obtaining information from events accompanying the transportation process is considered. The current approach to determining the causes of failures and technological breaches is aimed at determining the causes of the failure and assessing the consequences caused by the event. This approach is dictated by the constant presence of failures and the need to attribute them to the guilty division with the further study of the causes and prevention of such events. Modern data collection and processing technologies using artificial intelligence (AI) are already being implemented in many high-tech companies around the world. The goal of these technologies is to obtain and process a large amount of data and reveal previously unknown dependencies. Using these dependencies in the transportation process will make it possible to improve the latter. A similar approach was implemented in the 70–80-ties of the last century, when the introduction of automated control systems in railway transport began. Improving the technology of the transportation process has reduced restrictions in the development of infrastructure for road transport in many areas. To date, the use of big data processing results is a continuation of the already implemented technology for improving the transportation process. Offering such a service to other market participants and using “own” and “foreign” data will allow processing more information and gain leadership in this technology. The modern technology-based dominating in the railway industry may allow the company to become a long term leader in the market, including the global one.

Keywords

risk management, transportation process, train traffic, artificial intelligence, big data, train schedule

For citation

Burdyak P. S. Upravlenie riskami v organizatsii dvizheniya poezdov [Risk management in train operation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 76–82.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).76-82

Article Info

Received: 26.08.2021, Revised: 03.09.2021, Accepted: 09.09.2021

Введение

Риски в организации движения поездов можно поделить на внешние и внутренние. Как правило, все внимание уделяется внутренним рискам, которые вносят непредвиденные коррективы в перевозочный процесс. К ним, в первую очередь, относятся отказы технических средств, технологические нарушения и инфраструктурные ограничения. Внешние риски рассматриваются как более системные явления: колебания объемов перевозок, сезонность, экономические факторы и т. д. При этом существуют внешние риски более высокого уровня, как пример, доминирование в отрасли [1]. Потеря контроля над доминированием в отрасли, как показывает практика, надолго отодвигает игрока в позицию ведомого.

Внешние и внутренние риски в организации движения поездов связаны и не должны быть разделены. Стратегия управления ими не может выбрать путь уклонения или передачи их. Единственное, что позволит контролировать перевозочный процесс и транслировать его во вне – это путь снижения и принятия внутренних и внешних рисков. Данный подход является наиболее зрелым и правильным [2].

Формирование модели

Показатели движения поездов на сети ОАО «РЖД» превосходят показатели многих сетей зарубежных стран как по перевозке грузов, так и по количеству транспортных единиц (поездов) [3, 4] (табл.).

Данные об объемах перевозок
Traffic data

Ранг	Страна	Млрд т·км	Год
1	Китай	2,696	2017
2	Россия	2,596	2018
3	США	2326	2016
4	Индия	1223	2018
5	Канада	352	2011
6	Бразилия	267	2014
7	Украина	237	2011
8	Казахстан	236	2012
9	Австралия	198	2008
10	Южная Африка	135	2014
11	Мексика	81	2014
12	Германия	75	2014
13	Беларусь	45	2014
14	Польша	32	2014
15	Франция	32	2014

16	Великобритания	24,4	2014
17	Узбекистан	22	2012
18	Иран	22	2013
19	Швеция	21,1	2014
20	Япония	21	2014

Несмотря на трудности в организации такого процесса, следует разглядеть возможности получения конкурентного преимущества. И, в первую очередь, это получение большого количества данных (bigdata) о продвижении потоков поездов, которые можно собрать и применить для анализа. Объем таких данных в разы больше, чем у железнодорожных сетей Европы, где грузовые перевозки на втором месте после скоростного и высокоскоростного движения. Опережение в использовании результатов анализа больших данных позволит получить положительные результаты на сети ОАО «РЖД» и предложить их рынку транспортных услуг (рис. 1).



Рис. 1. Схема использования данных, их анализ и формирование гипотезы

Fig. 1. Data use and analyses and building a hypothesis

На рис. 2 укрупненно изображена проверка гипотезы и ее использование:

– выдвигается гипотеза о наличии зависимости;

- данные подвергаются анализу для подтверждения или опровержения гипотезы;
- устанавливается выбор области дальнейшего анализа для получения зависимостей;
- тестирование, сравнение результатов с уже известным опытом;
- опытная эксплуатация на полигоне или в пределах железной дороги;
- промышленная эксплуатация;
- адаптация для внешних рынков, выдвижение гипотез для новых рынков и новый виток развития.

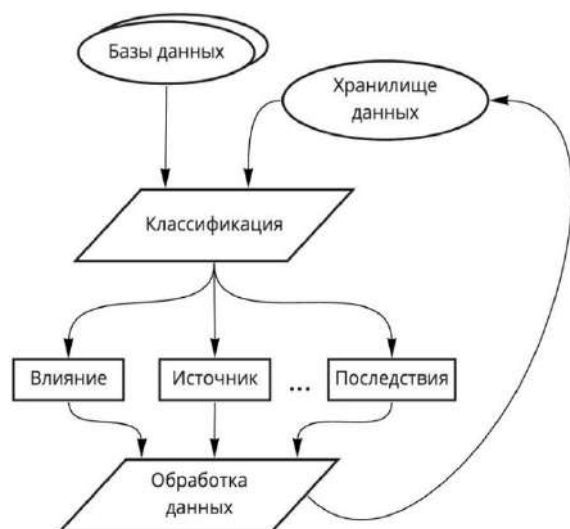


Рис. 2. Укрупненная схема проверки гипотезы и ее использование

Fig. 2. The enlarged scheme of verifying the hypothesis and its use

Неостановимое развитие перевозочного процесса с учетом «своей» и «чужой» базы данных, извлечение прибыли, техническое и технологическое доминирование будут являться результатом. Данный подход решает проблему постоянного совершенствования перевозочного процесса за счет синергетического эффекта исходных данных из нескольких источников.

Основным в данной последовательности следует выделить этап выдвижения гипотезы о существующей зависимости и решаемой проблеме. Для формирования пула гипотез предлагается обработка материалов в цифровом виде с использованием алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ). Здесь должны быть проанализированы рабочие материалы, научные исследования, конференции, материалы библиотек и др.

Примерами реально применяемых технологий по применению автоматизированной обработке текста являются несколько десятков систем. Ниже

приведены в качестве примера три: Томита-парсер, RCO Fact Extractor SDK, ABBYY FlexiCapture [5, 6].

Формирование гипотез о возможных проблемах более важная задача, чем применение уже известных и применяемых технологий по сбору и обработке данных. В том числе и ошибок, допускаемых человеком. Эти ошибки также могут быть описаны, например, с использованием моделей Й. Расмусена [7] и Дж. Ризона [8].

Данные модели и их основные принципы позволяют использовать их для поиска слабых мест в новых более сложных технических и технологических системах с учетом возможных ошибок человека.

С развитием информационных технологий по сбору и хранению данных – баз данных (databases), хранилищ данных (data warehousing) появилась возможность обрабатывать большие объемы информации без участия человека.

Используя Data Mining возможно обработать тысячи источников информации (материалы научных исследований, конференций, материалов библиотек, газетных статей), чтобы извлечь и собрать данные, которые могут иметь отношение к интересующей теме по прогнозированию рисков в организации движения поездов. Извлечение данных будет первым и подготовительным этапом в процессе анализа.

На этом этапе с помощью Data Mining решается задача определения влияния события на процесс движения поездов и дальнейшая классификация входных событий по известным характеристикам (влияние метеоусловий, геополитические события в мире, спад или рост экономики, новые идеи конкурирующих игроков на рынке перевозок и т. д.). Данные после этого этапа в упорядоченном, согласно классификации виде, размещаются в хранилищах данных.

Использование Machine Learning для обучения и дальнейшего применения основано на использовании:

- искусственного интеллекта;
- математической статистики;
- численных методов;
- теории вероятности;
- теории графов и др.

Главная задача такой системы: обучаться для решения задач сходных с пулом классифицированных событий.

Для решения данной задачи нет ограничения в применении метода обучения с учителем или без него [9]. В случае, если мы применяем метод обучения с учителем (Supervised learning), для каждого прецедента задается пара: ситуация – требуемое решение. При выборе метода обучения без учителя (Unsupervised learning) – только ситуация. В этом случае система обучается выполнять поставленную задачу без вмешательства со стороны.

Для метода обучения без учителя формулируется задача кластеризации и выявления ее структуры. Методами решения могут быть графовые алгоритмы кластеризации или статистические алгоритмы кластеризации [10].

Разбивка выборки на группы схожих объектов по рискам, значимым событиям конкурирующих игроков, определению трендов позволит упростить в дальнейшем обработку данных и принятие решения по стратегическим действиям в управлении рисками в организации движения поездов.

В качестве примера работы модели рассмотрен перевозочный процесс, который имеет колебания, связанные с разными факторами. Эти факторы в большинстве своем случайны и не прогнозируемы. Они заложены в расчете пропускных способностей железнодорожных линий и предназначены для восстановления работоспособности системы [11]. Однако данный резерв имеет ограничения. Поэтому часть перерывов в движении поездов можно сократить и, соответственно, увеличить качественные показатели железных дорог.

Из всех направлений поиска зависимостей между условиями перевозочного процесса и его исполнением стоит выделять наиболее вероятные. Для отказа технических средств (пул данных находится в таких системах, как Комплексная автоматизированная система учета, расследования и анализа случаев технологических нарушений (КАСАТ) и Комплексная автоматизированная система учета, контроля устранения отказов в работе технических средств и анализа их надежности (КАСАНТ)), повлекших за собой сбой в движении поездов, исходными данными могут послужить:

1. Эффективность действий работников по ликвидации нарушения (численность, опыт, обеспе-

чение необходимыми ресурсами) – данные Единой корпоративной автоматизированной системы управления трудовыми ресурсами (ЕКАСУТР).

2. Состояние объекта отказа (наработка в часах, периодичность обслуживания, производитель) – данные Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой (ЕКАСУИ).

3. Природные условия (температура, осадки, время суток, скорость ветра) – данные метеостанций.

4. Другие данные из систем ГИД, ГИР, Автоматизированная система оперативного управления перевозками (АСОУП).

Из выбранных данных по отказам следует проводить логические связи и систематизировать их по месту, времени, количеству, частоте, удаленности от объектов воздействия и т. д. Bigdata и ИИ позволяют не ограничиваться очевидными связями как в примере: работник службы «В» и работник службы «П» смогли сократить время отказа за счет их случайного нахождения в месте отказа (выполняли другие должностные обязанности). Время доставки к месту отказа будет результатом перекрестного сопоставления отказов, не связанных друг с другом. Это может повлиять на расположение мест дислокации ответственных работников.

Другой неочевидный пример: в группе поездов на перегоне первым идет поезд под управлением самого опытного (отдохнувшего, благополучного, здорового, сильного и т. д., т. е. количество критериев не ограничено для bigdata) машиниста. Предположим, что первым идет «самый», а замыкает «не самый» машинист. При этом для системы «не самый» не значит «плохой», а всего лишь уступающий «самому». При возникновении отказа, связанного с неисправностью локомотива, время выхода из него меньше, если первым идет «самый», и, соответ-

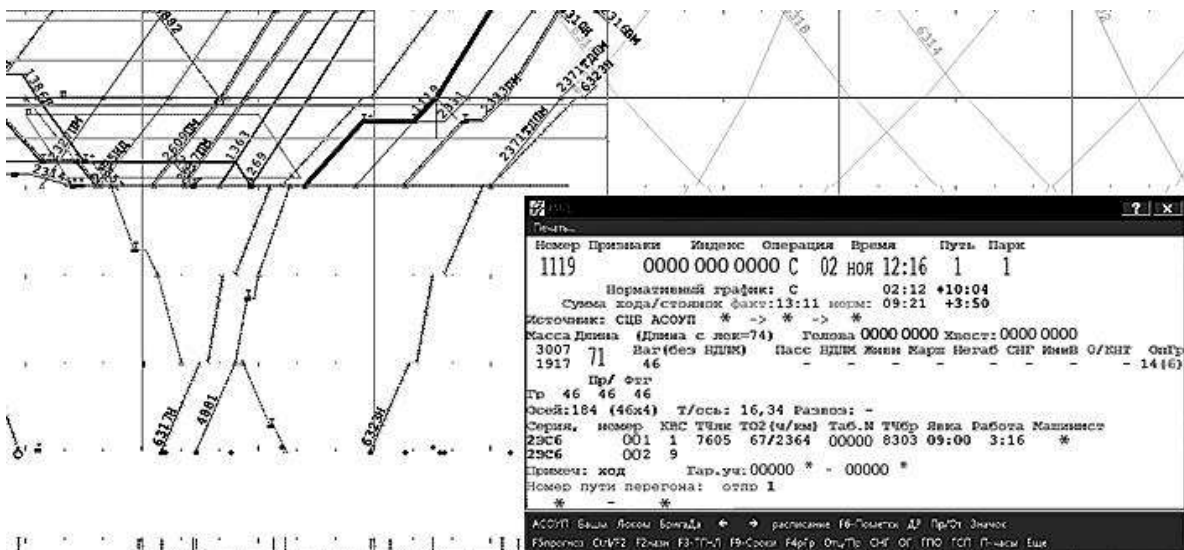


Рис. 3. Фрагмент графика исполненного движения поездов на перегоне

Fig. 3. Graph fragment of the performed train traffic on the stage

ственно, больше, если группу ведет замыкающий «не самый». На рис. 3 представлен фрагмент графика исполненного движения поездов с описанной ситуацией. Данные на рисунке обезличены.

На рис. 3 представлен реальный случай задержки поезда № 1119 на перегоне и последующая задержка трех грузовых поездов. При этом за час до нарушения поезда большей массы проходили перегон без сбоев. Ликвидация задержек на перегоне и движение по графику восстановилось только спустя 50 мин.

Данный случай был зарегистрирован в системе КАСАТ по пометке поездного диспетчера и подлежит расследованию и отнесению вины за нарушение на ответственную службу или подразделение. Однако группа из шести поездов, которая прошла без сбоев перед отправленным электропоездом, не будет проанализирована. Для этого нет причины. При этом данная группа, возможно, несет большую информацию о сочетании поездов и порядке их отправления, чем «сбойный № 1119».

Из анализа поездной ситуации можно выделить информацию о случае по данным ГИД без ис-

пользования специальных алгоритмов. Например:

- время работы машиниста;
- данные о локомотиве;
- данные о поезде;
- наличие ограничений на перегоне и станциях участка;
- наличие сбоев в расписании на предыдущих участках и пр.

Эти данные используются в основном для принятия решения об ответственности за нарушение. Они даже не сопоставляются с такими же нарушениями во всем многообразии сочетаний факторов, окружающих нарушение.

Стоит отметить, что поезда, которые прошли место нарушения до и после поезда № 1119 имели, согласно рис. 3, дополнительные литеры в номере поезда: ПМ; НД; ТДПМ. Это означает, что условия ведения таких поездов было осложнено повышенной массой, негабаритными грузами, длинносоставностью.

Можно предположить, что снижение последствий по сравнению с исходным расположением машинистов в группе будет у любого измененного

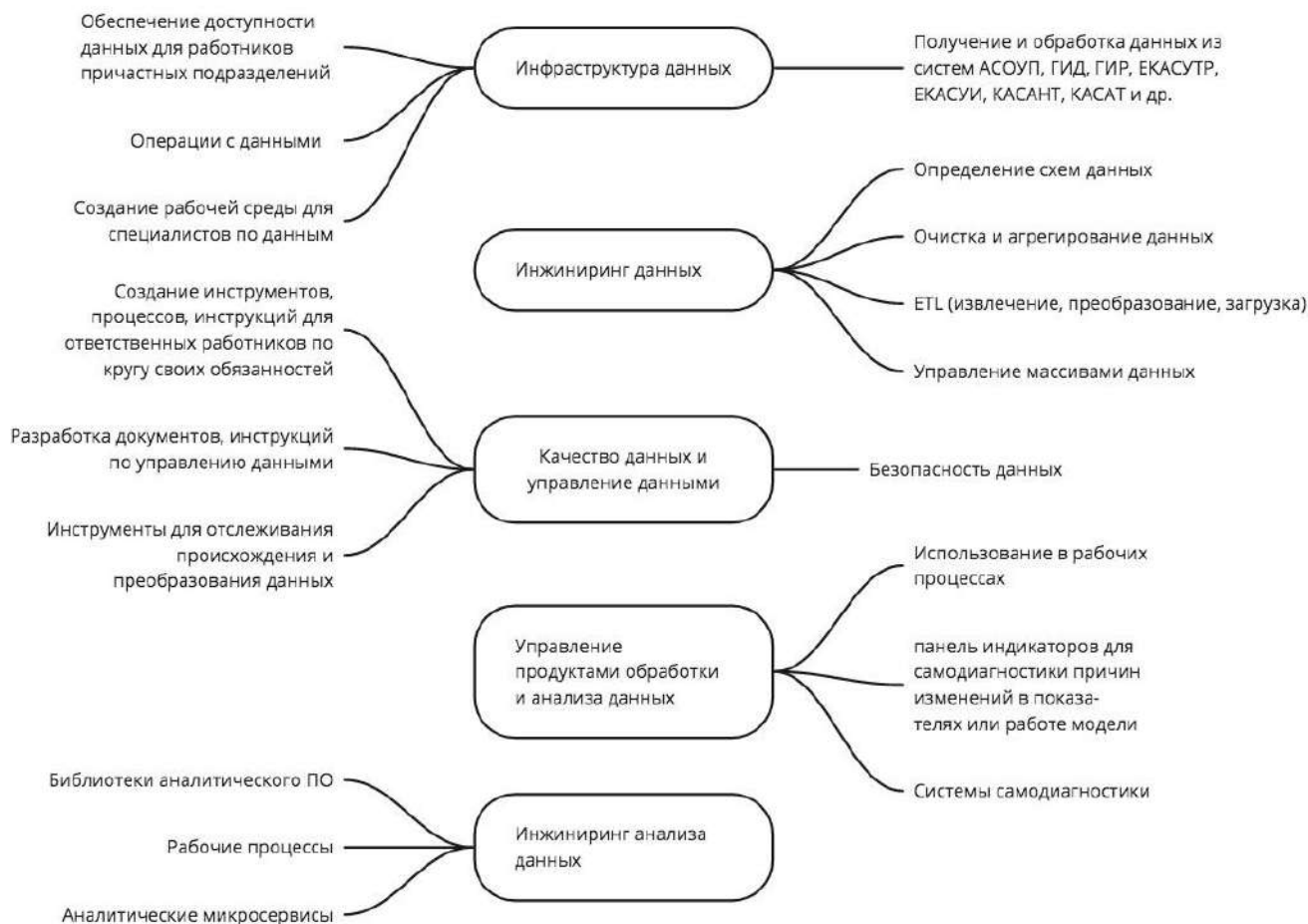


Рис. 4. Схема работы с данными на всех этапах реализации стратегии управления рисками
Fig. 4. Scheme of work with data in all stages of implementation of the risk management strategy

расположения порядка машинистов. При этом влияние на технологию работы станций отправления будет тоже положительным [12, 13]. Однако это только предположение, которое требует подтверждения.

Эффект перегруппировки порядка отправления будет в случаях, когда поезда прошли участок с минимальным количеством сбоев. В случаях, когда случился сбой в графике движения поездов, этого мы не увидим.

Если придерживаться такого порядка вещей, подкрепленного данными анализа огромной выборки случаев сбоев, можно получить незаметный эффект локально и заметный глобально.

Размер группы и размещение машинистов позволит дать неочевидный результат: повысить пропускную способность, участковую скорость и запустить механизм более глубокого изучения эффекта. Особенную важность данный подход приобретает при планировании проследования барьерных мест и выполнении показателей вариантного графика движения поездов.

Финляндия, Канада и другие страны уже столкнулись с проблемой повышения качества работы локомотивных бригад и решают проблему неординарным способом: за счет контроля здоровья, питания, отдыха, психологического состояния работника и членов его семьи на основе данных мониторинга, получая их из разных источников [14–16]. Принцип тот же – анализ многих ранее не учтенных факторов, которые могут влиять на процесс.

Результатом применения такого подхода для компании:

- новые данные о пользователях системы и за ее пределами;
- повышение доверия к инструментам ИИ;
- дополнительная информация об объектах в операционном окружении;
- индивидуальные рекомендации как система поддержки решений;
- автоматизация рутинных действий;

– удобство и экономия процесса управления перевозок;

– упрощение принятия решений;

– постоянный поиск лучших комбинаций и решений;

– информация об устойчивости к риску.

На рис. 4 изображена система работы с данными для реализации стратегии сокращения рисков.

Заключение

Стратегия управления рисками должна иметь цель сбора гипотез и их решений для перевода функции поиска проблем из области ручного труда в автоматизированный с использованием ИИ. Появление алгоритмов более высокого уровня с обеспечивающей системой, состоящей из данных существующих автоматизированных систем управления (АСУ), и моделирование развития событий – тенденции доминирования.

Для скорейшего решения задач, сформулированных в статье, необходимо их адресовать не только специалистам на местах, но и во вне, т. е. в уже существующие каналы связи с потенциальными решениями: индивидуальным предпринимателям, стартапам, платформам по поиску идей и т. д.

Для первого этапа могут использоваться данные существующих АСУ, а далее уже данные измененных и дополненных АСУ. Эти изменения должны быть основаны на полученных и прогнозных решениях из областей поиска решений вне областей, охватываемых существующими АСУ.

Итогом изложенного является технологический подход, а не инфраструктурный.

Появление более совершенной технологии позволит частично компенсировать создание новой инфраструктуры и использовать существующую инфраструктуру и ее резервы за счет тонкой настройки перевозочного процесса.

Данные результаты могут быть предложены игрокам транспортного рынка железнодорожного транспорта повсеместно и за небольшие гонорары, так как основная цель – получить еще большие данные для совершенствования собственных процессов.

Список литературы

1. Шагинян С.Г., Радченко Е.В., Тимченко О.В. Рыночное доминирование в грузовых железнодорожных перевозках // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление. 2018. № 2 (93). С. 74–77.
2. Селюков В.К., Гончаров С.Г. Управление рисками. М. : МГТУ, 2001. 359 с.
3. Левин Д.Ю., Павлов В.Л. Расчет и использование пропускной способности железных дорог. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп, 2011. 364 с.
4. List of countries by rail usage // Wikipedia : site. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_rail_usage (дата обращения: 02.11.2020).
5. Lee J., Park G., Sim B. Analysis of human errors in trip cases of Korean NPPs // Journal of the Korean Nuclear Society. 1996. Vol. 28. № 6. P. 563–575.
6. Рубайло А.В., Косенко М.Ю. Программные средства извлечения информации из текстов на естественном языке // Альманах современной науки и образования. 2016. № 12 (114). С. 87–92.
7. Rasmussen J. Human errors: a taxonomy for describing human malfunction in industrial installations // Journal of Occupational Accidents. 1982. Vol. 4. № 2-4. P. 311–335.
8. Reason J. Human error. NY : Cambridge University Press, 1990. 302 p.

9. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика = Neural Computing. Theory and Practice. М. : Мир, 1992. 240 с.
10. Дюран Б., Оделл П. Кластерный анализ. М. : Статистика, 1997. С. 27–35.
11. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог : утв. ОАО «РЖД» от 10.11.2010, №128. М. : Техноинформ, 2011. 180 с.
12. Bessoneno S., Badazhkov M. Issues of regulation of fillability of a train traffic schedule // MATEC Web of Conferences. Siberian Transport Forum – TransSiberia 2018. Novosibirsk, 2018. Vol. 239, 02004 (2018). P. 1–11.
13. Бадажков М.А., Бессоненко С.А. Энергоэффективное планирование отправления поездов // Транспорт: наука, техника, управление. 2019. № 5. С. 11–15.
14. Некрашевич В.И., Сальченко В.Л., Ковалев В.Н. Методика составления именных графиков работы и отдыха локомотивных бригад // Вестн. белорус. гос. ун-та трансп. Сер.: наука и транспорт. 2003. № 2 (7). С. 25–27.
15. Машинистам дадут отдохнуть. Гудок. 2019. № 78 (26687). Электрон. версия. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1463484> (Дата обращения 04.02.2020).
16. Future development of traffic schedules on German Railways // Der Eisenbahningenieur. 2015. № 12. P. 6–8, 10–11.

References

1. Shaginyan S.G., Radchenko E.V., Timchenko O.V. Rynochnoye dominirovaniye v gruzovykh zheleznodorozhnykh perevozkakh [Market dominance in freight railway transportation]. *Nauka i obrazovaniye: khozyaystvo i ekonomika; predprinimatel'stvo; pravo i upravleniye* [Science and education: economy and Economics; entrepreneurship; law and management], 2018, No. 2(93), pp. 74–77.
2. Selyukov V.K., Goncharov S.G. Upravleniye riskami [Risk Management]. Moscow: MSTU Publ., 2001. 359 p.
3. Levin D.Yu., Pavlov V.L. Raschet i ispol'zovaniye propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog [Calculation and use of railway capacity]. Moscow: Federal state educational institution "educational and Methodological center for education in railway transport", 2011. 364 p.
4. List of countries by rail usage. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_rail_usage Accessed: November 02, 2020.
5. Lee J., Park G., SIM B. Analysis of human errors in cases of shutdown of Korean nuclear power plants. *Journal of the Korean nuclear society*, 1996, Vol. 28, No. 6, pp. 563–575.
6. Rubailo A.V., Kosenko M.Yu. Programmnyye sredstva izvlecheniya informatsii iz tekstov na yestestvennom yazyke [Software tools for extracting information from natural language texts]. *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya* [Almanac of modern science and education], 2016, No. 12(114), pp. 87–92.
7. Rasmussen J. human errors: taxonomy for the description of human malfunctions in industrial installations. *Journal of industrial accidents*, 1982, Vol. 4, No. 2-4, pp. 311–335.
8. Reason J. Human error. NY: Cambridge University Press, 1990. 302 p.
9. Wasserman F. Neyrokomp'yuternaya tekhnika: Teoriya i praktika [Neurocomputer technology: Theory and practice]. Moscow: Mir Publ., 1992. 240 p.
10. Duran B., Odell P. Klasternyy analiz [Cluster analysis]. Moscow: Statistics Publ., 1997, pp. 27–35.
11. Instruksiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog : utv. ОАО "RZHD" 10.11.2010 № 128 [Instructions for calculating the cash capacity of Railways: Approved by JSC "Russian Railways" November 10, 2010 No. 128.]. Moscow: Technoinform, 2011. 180 p.
12. Bessoneno S., Badazhkov M. Issues of regulation of train schedule occupancy. *Matek Web of Conferences. Siberian Transport Forum-TRANS-Siberian 2018 (Novosibirsk, Russia, May 16-19, 2018)*, 2018, Vol. 239, 02004 (2018), pp. 1–11.
13. Badazhkov M.A., Bessoneno S.A. Energoeffektivnoye planirovaniye otpravleniya poyezdov [Energy-Efficient planning of train departure]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye* [Transport: science, technology, management], 2019, No. 5, pp. 11–15.
14. Nekrashevich V.I., Salchenko V.L., Kovalev V.N. Metodika sostavleniya imennykh grafikov raboty i otdykha lokomotivnykh brigad [Method of drawing up nominal schedules of work and rest of locomotive crews]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta* [Bulletin of the Belarusian state University of transport], 2003, No. 2(7), pp. 25–27.
15. Mashinistam dadut otdokhnut' [Drivers will be given a rest]. *Gudok* [Beep], 2019, No. 78(26687).
16. Future developments of traffic schedules on German Railways. *Der Eisenbahningenieur*, 2015, No. 12, pp. 6-8, 10–11.

Информация об авторах

Бурдяк Павел Станиславович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры железнодорожных станций и узлов, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, e-mail: burdyakps@mail.ru

Information about the authors

Pavel S. Burdyak – associate Professor, associate Professor of the Subdepartment Railway stations and junctions, Siberian Transport University, Novosibirsk, e-mail: burdyakps@mail.ru

Цифровые модели перспективных систем тягового электроснабжения повышенного напряжения

А. В. Крюков^{1,2}✉, А. В. Черепанов², А. Д. Степанов², Д. А. Середкин², И. А. Фесак²

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

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

✉ and_kryukov@mail.ru

Резюме

Один из путей решения задач повышения энергетической эффективности и улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения магистральных железных дорог заключается в использовании тяговых сетей повышенного напряжения. В современных условиях для внедрения таких сетей необходима разработка их цифровых моделей, обеспечивающих адекватный анализ качества электроэнергии, энергетической эффективности, электромагнитной совместимости и безопасности. Такие модели могут быть реализованы на базе методов моделирования режимов систем электроснабжения в фазных координатах, разработанных в программном комплексе «Fazonord», созданном в Иркутском государственном университете путей сообщения. В статье представлены результаты моделирования режимов перспективных систем электроснабжения железных дорог с тяговыми сетями 50 и 50+110 кВ. Для сравнения проведено моделирование режимов традиционной тяговой сети 25 кВ. Полученные результаты позволили сформулировать следующие выводы: тяговая сеть 50+110 кВ обеспечивает наилучшую стабилизацию напряжения на токоприемниках электроподвижного состава; тяговые сети повышенного напряжения позволяют снизить токи электровозов и уменьшить нагрев проводов контактной сети; наименьшие потери мощности обеспечивает тяговая сеть 50+110 кВ, при этом для нее наблюдается наиболее низкие показатели варибельности потерь; за счет применения сетей повышенного напряжения можно получить снижение суммарного электропотребления; применение тяговых сетей повышенного напряжения приводит к увеличению уровней напряженности электрического поля по сравнению с сетями 25 кВ; максимальные и средние значения напряженности тяговой сети 50 кВ больше на 82 и 84 % соответственно, однако аналогичные параметры тяговой сети 50+110 кВ за счет питающего провода уменьшаются на 15 и 16 %; напряженность магнитного поля перспективных систем электроснабжения по сравнению с тяговой сетью 25 кВ уменьшается для сетей 50 кВ и 50+110 кВ на 50 и 84 % соответственно.

Ключевые слова

системы тягового электроснабжения повышенного напряжения, качество электроэнергии, энергетическая эффективность, электромагнитные поля, моделирование

Для цитирования

Крюков А.В. Цифровые модели перспективных систем тягового электроснабжения повышенного напряжения / А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Д. Степанов, Д. А. Середкин, И. А. Фесак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 83–91. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).83-91

Информация о статье

поступила в редакцию: 21.09.2021, поступила после рецензирования: 08.10.2021, принята к публикации: 11.10.2021

Digital models of advanced high-voltage traction power supply systems

A. V. Kryukov^{1,2}✉, A. V. Cherepanov², A. D. Stepanov², D. A. Seredkin², I. A. Fesak²

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ and_kryukov@mail.ru

Abstract

One of the ways to solve the problems of increasing energy efficiency and improving the quality of electricity in the power supply systems of the main railways is by using high voltage traction networks (TN). Under modern conditions, the introduction of such networks requires the development of their digital models providing an adequate analysis of the quality of electricity, energy efficiency, electromagnetic compatibility and safety. Such models can be built based upon the methods for modeling the modes of power supply systems in phase coordinates, implemented in the Fazonord software complex, developed at the Irkutsk State University of Communications. The article presents the results of modeling the modes of promising power supply systems for railways with traction networks of 50 and 50 + 110 kV. For comparison, a simulation of the modes of a traditional 25 kV TN was carried out. The results obtained made it possible to formulate the following conclusions: TN 50 + 110 kV provides the best voltage stabilization at the pantographs of electric rolling stock; high-voltage traction networks allow to reduce the currents of electric locomotives and reduce the heating of the wires of the contact network; the lowest power losses are provided by the TN 50 +

110 кВ; в то же время, это TN, для которого наименьшие показатели изменчивости потерь наблюдаются; благодаря использованию сетей повышенного напряжения, возможно получение снижения в общей мощности потребления; использование сетей высокого напряжения приводит к увеличению уровней напряженности электрического поля по сравнению с 25 кВ, максимальные и средние значения напряженности для 50 кВ выше на 82 и 84 %, соответственно; однако, аналогичные параметры для TN 50 + 110 кВ по сравнению с линией питания снижены на 15 и 16 %; напряженность магнитного поля для перспективных систем питания, по сравнению с 25 кВ TN, снижается для 50 кВ и 50 + 110 кВ TN на 50 и 84 %, соответственно.

Keywords

high-voltage traction power supply systems, electricity quality, energy efficiency, electromagnetic fields, modeling

For citation

Kryukov A. V., Cherepanov A. V., Stepanov A. D., Seredkin D. A., Fesak I. A. Tsifrovyye modeli perspektivnykh sistem tyagovogo el-ektrosnabzheniya povyshennogo napryazheniya [Digital models of advanced high-voltage traction power supply systems]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 83–91. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).83-91

Article info

Received: 21.09.2021, Revised: 08.10.2021, Accepted: 11.10.2021

Введение

Для увеличения пропускной способности железнодорожных магистралей, снижения потерь мощности и улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения магистральных железных дорог предлагается использовать системы тягового электроснабжения (СТЭ) повышенного напряжения, например, 50 кВ и 50+110 кВ [1–7]. Для практического применения этих СТЭ необходим детальный анализ их режимов на основе цифровых моделей [8–11]. Задачи такого анализа заключаются в определении показателей качества электрической энергии и энергетической эффективности, а также условий электромагнитной совместимости и безопасности [12–18]. В статье представлены результаты определения этих показателей для перспективных СТЭ повышенного напряжения. Для сравнения выполнено моделирование традиционной СТЭ 25 кВ.

Методика и результаты моделирования

Для определения показателей работы перспективных СТЭ 50 и 50+110 кВ можно использовать методы моделирования, реализованные в программном комплексе «Fazonord», разработанном в Иркутском государственном университете путей сообщения. Принципы его применения для определения режимов СТЭ описаны в [19, 20].

Моделирование режимов СТЭ 50 кВ и 50+110 кВ проведено применительно к двухпутному участку. Расчетные схемы, фрагменты которых показаны на рис. 1, имели в своем составе модели трех тяговых трансформаторов и двух межподстанционных зон (МПЗ). Левая МПЗ была разбита на пять участков, протяженностью по 10 км. Кроме того, в схеме были представлены модели четырех линий электропередачи 220 кВ.

При моделировании рассматривалось движение 7 поездов массой 6 300 т в нечетном направлении и такого же количества поездов массой 6 000 т – в четном. График движения и токовые профили по-

ездов приведены (рис. 2). Расположение токоведущих частей показано на рис. 3.

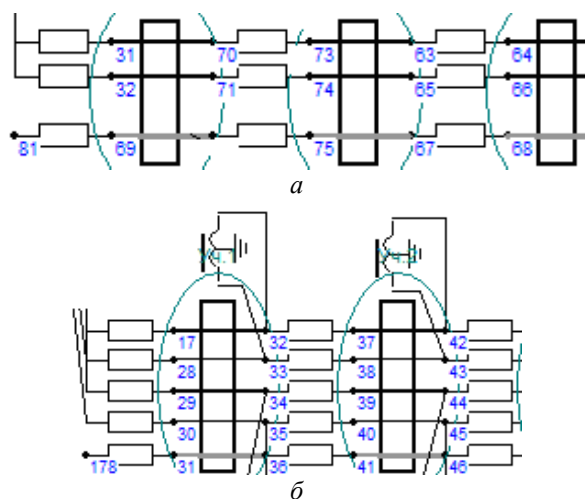
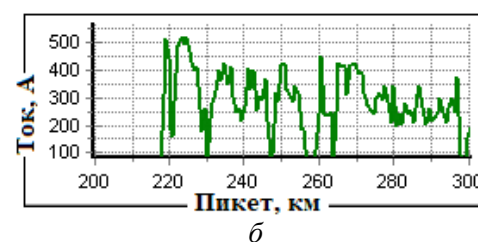
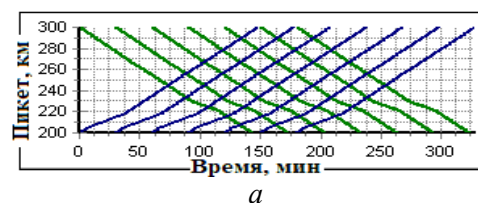


Рис. 1. Фрагменты схем расчетных моделей:
а – 50 кВ; б – 50+110 кВ

Fig. 1. Scheme fragments for calculated models:
a – 50 kV; b – 50+110kV



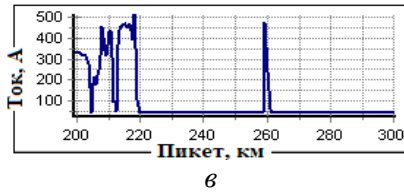


Рис. 2. График движения (а) и токовые профили нечетного поезда массой 6 300 т (б) и четного поезда массой 6 000 т (в)
Fig. 2. Motion graph (a) and current profiles of an odd train weighing 6300 t (b) and an even train weighing 6000 t (v)

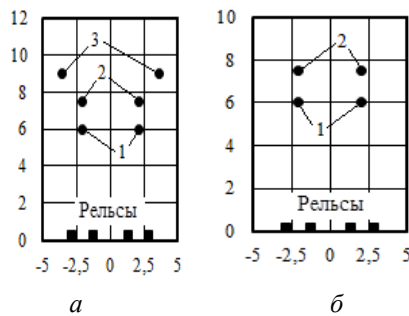


Рис. 3. Расположение токоведущих частей в сечении тяговой сети 50+110 кВ (а) и 50 кВ (б): 1 – контактный провод; 2 – несущий трос; 3 – питающий провод
Fig. 3. The position of the current-carrying parts in the cross section of the traction network 50+110 kV(a) and 50 kV (b): 1 – trlley wire; 2 – carring cable; 3 – power wire

На рис. 4 и 5 и в табл. 1 представлены результаты расчетов напряжений и токов первого поезда.

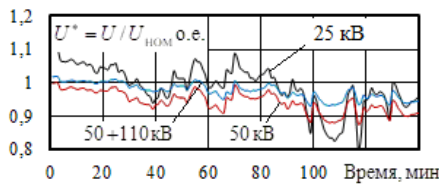


Рис. 4. Напряжения на токоприемнике первого поезда
Fig. 4. Voltage in the current collector of the first train

Таблица 1. Напряжения на токоприемнике первого поезда

Показатель	Тип тяговой сети		
	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ
Максимум	<i>1,10</i>	1,00	1,02
Среднее значение	<i>0,99</i>	0,94	<i>0,98</i>
Минимум	<i>0,80</i>	0,88	0,93
Размах	<i>0,30</i>	0,12	0,09
Среднеквадратичное отклонение	<i>0,06</i>	0,03	0,02

Примечание. Курсивом выделены экстремальные значения.

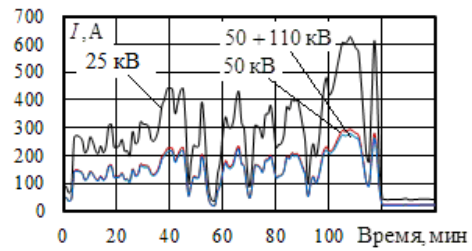


Рис. 5. Токи электровоза первого поезда
Fig. 5. Currents of the first train's electric locomotive

На рис. 6, 7 и в табл. 2, 3 приведены результаты моделирования потерь мощности и суммарного электропотребления. На рис. 8 показаны зависимости перегревов проводов от времени

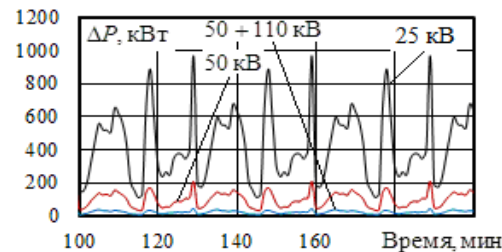


Рис. 6. Потери мощности на левых участках контактной сети по рис. 1 а, б
Fig. 6. Power loss in the left sites of the contact network, fig.1 a, b

Таблица 2. Потери мощности на левых участках контактной сети, кВт
Table 2. Power loss in the left sites of the contact network, kW

Показатель	Тип тяговой сети		
	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ
Максимум	780,00	166,00	37,00
Среднее значение	236,71	57,75	13,83
Минимум	0,04	0,08	0,48
Размах	779,96	165,92	36,52
Среднеквадратичное отклонение	195,76	44,23	9,55

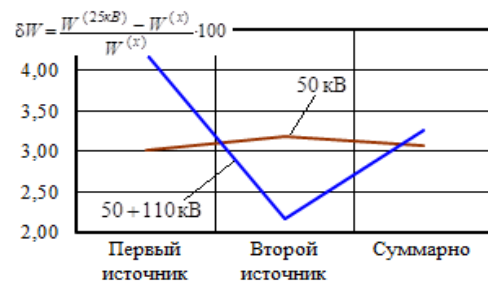
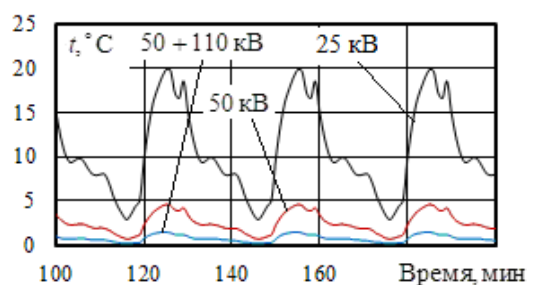


Рис. 7. Изменения суммарного электропотребления: x = 50 кВ или 50 + 110 кВ
Fig. 7. Changes in total power consumption: x = 50 кВ или 50 + 110 кВ

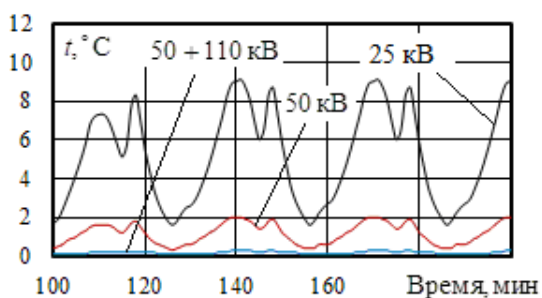
Таблица 3. Суммарное электропотребление, МВт·ч
Table 3. Total power consumption, MWh

Параметр	Тип тяговой сети			Различия между столбцами, %	
	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ	2/3	2/4
1	2	3	4	5	6
W_1	73,56	71,34	70,47	3,02	4,20
W_2	65,92	63,83	64,48	3,18	2,18
Сумма	139,51	135,22	134,96	3,07	3,26

Примечание. W_1 – электропотребление от первого источника; W_2 – электропотребление от второго источника.



а



б

Рис. 8. Перегрев проводов контактной сети:
а – нечетное направление; б – четное направление

Fig. 8. Wire overheating in the contact network:
а – odd direction, б – even direction

Таблица 4. Максимальные значения перегрева контактного провода

Table 4. Maximum values of trolley wire overheating

Интервал усреднения	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ
1 мин.	19,8	4,6	1,5
3 мин.	19,5	4,5	1,5
20 мин.	13,4	3,2	1,0

По результатам расчета потерь мощности и суммарного электропотребления, а также токов и напряжений первого поезда можно сделать следующие выводы:

1. СТЭ 50+110 кВ обеспечивает наилучшую стабилизацию напряжения на токоприемниках электроподвижного состава.

2. Перспективные тяговые сети повышенного напряжения позволяют снизить токи электровозов. Так, среднее значение отношения токов систем тяги 25 кВ и 50+110 кВ достигает $\gamma_{50} = I^{(25)} / I^{(50)} = 1,91$; аналогичный параметр СТЭ 50+110 кВ составляет 1,98; максимальные величины этих показателей соответственно равны 2,2 и 2,35.

3. Уменьшение токов позволяет снизить нагрев проводов контактной сети. Так, перегрев проводов нечетного пути ТС 50 кВ относительно ТС 25 кВ снижается в 4 раза до значений 4,5 °С при одностороннем и трехминутном интервале усреднения и до 3,2 °С при 20 минутном интервале усреднения. Применение СТЭ 50+110 кВ приводит к снижению перегрева до значений менее 1,5 °С.

4. Наименьшие потери мощности обеспечивает ТС 50+110 кВ, при этом для данной ТС наблюдается наиболее низкие показатели вариальности потерь.

5. За счет применения СТЭ повышенного напряжения можно получить снижение суммарного электропотребления 3,1–3,3 %. Первая цифра соответствует СТЭ 50 кВ, а вторая – 50+110 кВ. В обозначенных единицах снижение электропотребления достигает соответственно 4,3 и 4,6 МВт·ч за время моделирования 327 мин.

На рис. 9 и в табл. 5 приведены результаты расчета коэффициентов несимметрии напряжения на шинах 220 кВ средней тяговой подстанции (ТП 2).

Таблица 5. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности k_{2U} на шинах 220 кВ второй тяговой подстанции
Table 5. Asymmetry coefficients for the reverse sequence k_{2U} on 220 kV tines for the second traction substation

Параметр	Тип тяговой сети			Различия между столбцами, %	
	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ	2/3	2/4
1	2	3	4	5	6
Минимум	0,04	0,04	0,08		
Среднее значение	0,98	0,87	0,76	10,93	22,61
Максимум	2,39	1,68	1,61	29,71	32,64
Размах	2,35	1,64	1,53	30,21	34,89
Среднеквадратичное отклонение	0,43	0,36	0,31	16,85	28,69

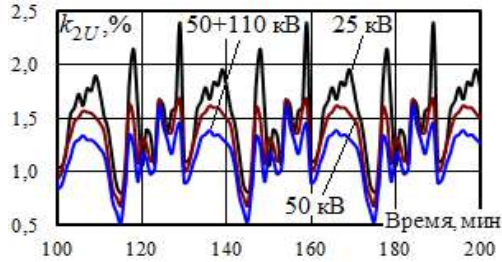


Рис. 9. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ второй тяговой подстанции

Fig. 9. Asymmetry coefficients of the reverse sequence on 220 kVt tires of the second traction substation

На рис. 10 и в табл. 6 представлены результаты определения суммарных коэффициентов гармоник на шинах 220 кВ тяговых подстанций.

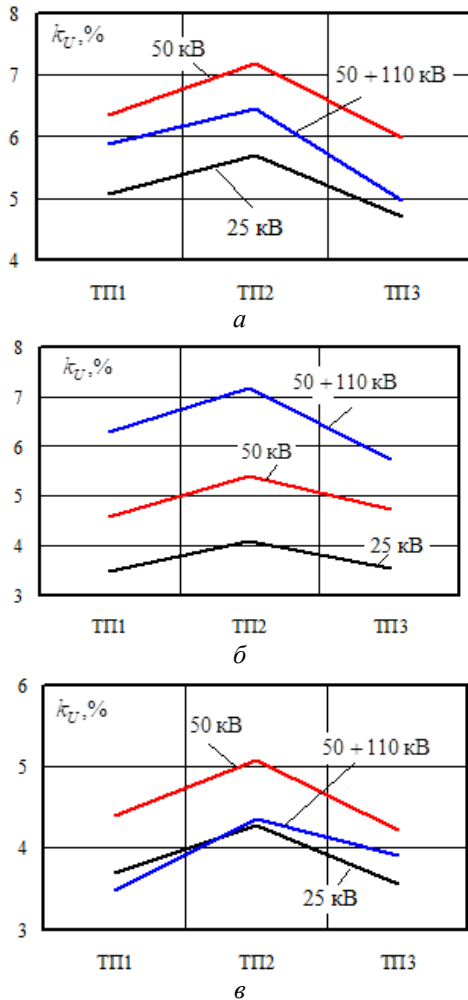


Рис. 10. Средние значения коэффициентов гармоник на шинах 220 кВ тяговых подстанций: а – фаза А; б – фаза В; в – фаза С

Fig. 10. Mean values of harmonic coefficients on tires of 220 kV traction substations: а - phase A; б - phase B; в - phase C

Таблица 6. Средние значения коэффициентов гармоник k_U на шинах 220 кВ ТП
Table 6. Average values of the coefficients of harmonics k_U on the buses of 220 kV TP

Фаза	Подстанция	Тип тяговой сети			Различия между столбцами, %	
		25 кВ	50 кВ	50+110 кВ	3/4	3/5
1	2	3	4	5	6	7
А	1	5,05	6,35	5,87	-25,74	-16,24
	2	5,67	7,18	6,45	-26,63	-13,76
	3	4,68	5,97	4,95	-27,56	-5,77
В	1	3,46	4,56	6,28	-31,79	-81,50
	2	4,07	5,39	7,17	-32,43	-76,17
	3	3,55	4,72	5,73	-32,96	-61,41
С	1	3,7	4,39	3,47	-18,65	6,22
	2	4,28	5,08	4,35	-18,69	-1,64
	3	3,56	4,22	3,91	-18,54	-9,83

На рис. 11 показана зависимость коэффициента несинусоидальности напряжения на шинах 220 кВ средней тяговой подстанции от времени.

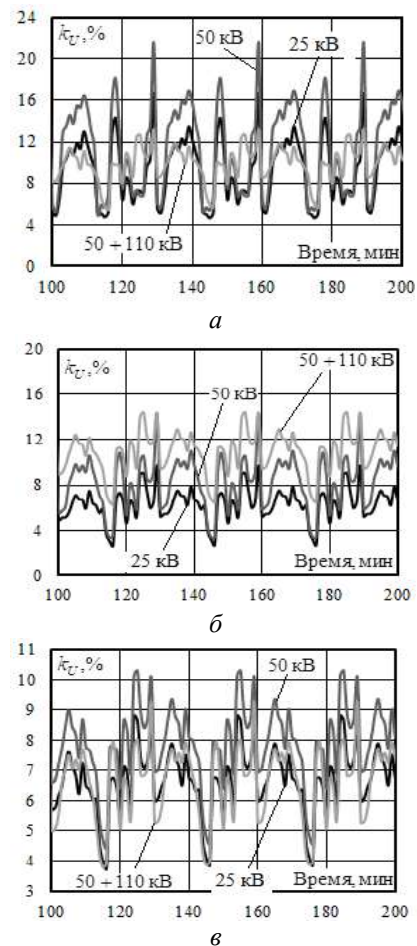


Рис. 11. Коэффициенты гармоник: а – фаза А; б – фаза В; в – фаза С

Fig. 11. Harmonic coefficients: а - phase A; б - phase B; в - phase C

На основе результатов расчета показателей качества электрической энергии можно сделать следующие выводы:

1. За счет уменьшенных токов в тяговых сетях 50 и 50+110 кВ средние значения k_{2U} на вводах 220 кВ тяговых подстанций (ТП) снижаются на 11 и 22 % соответственно по сравнению с типовой ТС 25 кВ. Аналогичные показатели для максимумов составляют 30 и 35 %. В ТС 25 кВ величины k_{2U} превышают нормально допустимые значения.

2. Применение СТЭ повышенного напряжения приводит к уменьшению показателей, характеризующих динамику изменения несимметрии во времени. Размах колебаний снижается для ТС 50 кВ на 30 %, а для ТС 50+110 кВ на 35 %. Аналогичные данные по среднеквадратическому отклонению составляют 17 и 29 % соответственно. Таким образом, в перспективных ТС для устранения несимметрии при выходе ее за допустимые пределы в результате роста тяговых нагрузок потребуется меньший диапазон регулирования симметрирующих устройств.

3. На шинах высокого напряжения перспективных ТС наблюдается повышенный уровень гармонических искажений по сравнению с ТС 25 кВ. Исключение составляет фаза С ТП 1, для которой величина k_U в СТЭ 50+110 кВ ниже, чем в СТЭ 25 кВ.

4. По фазам А и С наибольший уровень гармонических искажений наблюдается для тяговых подстанций СТЭ 50 кВ. По фазе В максимум k_U имеет место в СТЭ 50+110 кВ.

Условия электромагнитной безопасности [20] в системах тягового электроснабжения определяются величинами напряженностей электромагнитного поля (ЭМП). Результаты моделирования ЭМП показаны на рис. 12, 13 и в табл. 7. Электромагнитные поля определялись на высоте 1,8 м.

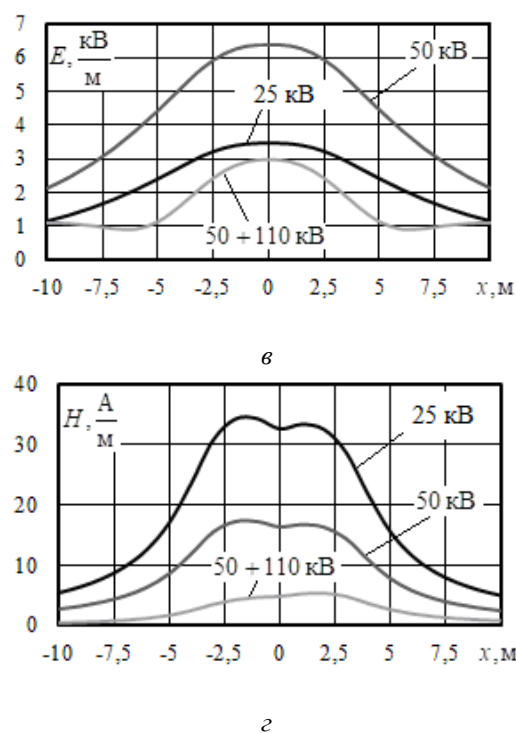
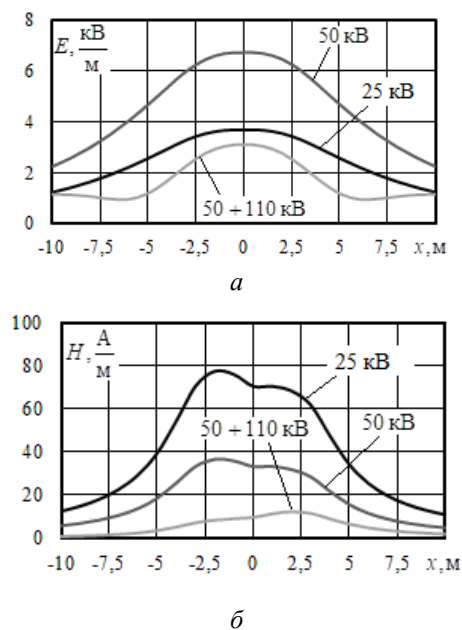


Рис. 12. Максимальные (а, б) и средние (в, г) значения напряженности электрического (а, в) и магнитного (б, г) поля

Fig. 12. Top (a, b) and average (v, g) values of electric (a, v) and magnetic (b, g) field strength

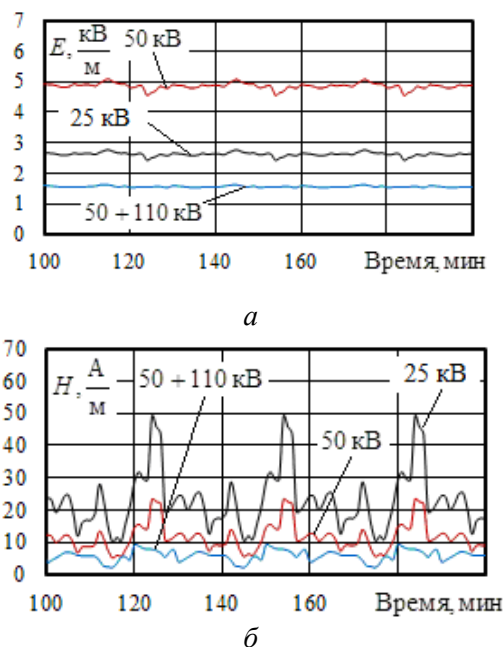


Рис. 13. Динамика напряженности электрического (а) и магнитного (б) поля

Fig. 13. Dynamics of electric (a) and magnetic (b) fields

Таблица 7. Напряженность электрического и магнитного поля

Table 7. Electric and magnetic field strength

Параметр	Тип тяговой сети			Различия между столбцами, %	
	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ	2/3	2/4
1	2	3	4	5	6
$Max(E_{max})$, кВ/м	3,68	6,71	3,11	-82,34	15,49
$max(H_{max})$, А/м	77,51	36,66	12,36	52,7	84,05
$Mid(E_{max})$, кВ/м	3,46	6,37	2,97	-84,10	14,16
$Mid(H_{max})$, А/м	34,23	17,21	5,32	49,72	84,46

Результаты расчета электромагнитных полей позволяют сделать следующие выводы:

1. Значения напряженности электрического и магнитного полей не превышают допустимые значения для электротехнического персонала.

2. Применение перспективных СТЭ приводит к увеличению уровней напряженности электрического поля. Так, максимальные и средние значения напряженности ТС 50 кВ больше, чем в ТС 25 кВ на 82 и 84 % соответственно. Однако аналогичные параметры ТС 50+110 кВ за счет питающего провода уменьшаются на 15 и 14 %.

3. Максимальные значения напряженностей магнитного поля уменьшаются по сравнению с СТЭ 25 кВ на 53 и 84 % для ТС 50 кВ и 50+110 кВ соответственно.

Заключение

Цифровые модели перспективных систем тягового электроснабжения могут быть реализованы на основе методов моделирования СТЭ переменного тока в фазных координатах, разработанных в ИРГУПС и реализованных в программном комплексе «Fazonord». Результаты моделирования для типовых межподстанционных зон СТЭ 50 и 50+110 кВ показали положительные эффекты от применения указанных СТЭ, заключающиеся в стабилизации напряжений на токоприемниках ЭПС, снижении потерь, уменьшении суммарного электропотребления, а также улучшении показателей качества электроэнергии по несимметрии на шинах 220 кВ тяговых подстанций. Однако, на шинах высокого напряжения перспективных ТС наблюдается повышенный уровень гармонических искажений по сравнению с ТС 25 кВ. Исключение составляет фаза С ТП 1, для которой величина k_U в СТЭ 50+110 кВ ниже, чем в СТЭ 25 кВ.

Применение перспективных СТЭ приводит к увеличению уровней напряженности электрического поля. Так, максимальные значения напряженности ТС 50 кВ больше, чем в ТС 25 кВ на 82 %. Аналогичные параметры ТС 50+110 кВ за счет питающего провода уменьшаются на 15 и 16 %.

Напряженность магнитного поля перспективных систем электроснабжения уменьшается по сравнению с СТЭ 25 кВ на 50 и 84 % для ТС 50 кВ и 50+110 кВ соответственно.

Список литературы

1. Котельников А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. М.: Интекст, 2002. 104 с.
2. Котельников А.В., Нестрахов А.С. Железнодорожный транспорт России в 2000-2030 гг. (научная концепция) // Вестник ВНИИЖТ. 2000. № 5. С. 3–15.
3. Kotelnikov A., Glonti A. Word trends in the development of railway electrification // Rail International. 2001. August/September. P. 26–35.
4. Бадёр М.П., Иньков Ю.М., Розенберг Е.Н. Энергосберегающие технологии интеллектуального железнодорожного транспорта // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 4. С. 36–43.
5. Котельников А.В., Лисицын А.Л., Быков В.А. Перспективы развития электрификации железных дорог России и задачи электротехнической промышленности по ее обеспечению // Электро. 2001. № 2. С. 2–4.
6. Василянский А.М., Мамошин Р.Р., Якимов Г.Б. Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц // Железные дороги мира. 2002. № 8. С. 40–46.
7. Электромагнитная безопасность систем тягового электроснабжения повышенного напряжения / А.В. Котельников, А.Б. Косарев, И.И. Полишкина и др. // Вестник ВНИИЖТ. 2002. № 6. С. 10–14.
8. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM // International Symposium on Electromagnetic Compatibility. EMC'09. Kyoto, 2009. P. 567–570.
9. Analysis of adverse effects on the public power grid brought by traction power-supply system / Gao Lin, Xu Yonghai, Xiao Xiangnin et al. // 2008 IEEE Canada Electric Power Conference. 2008. DOI: 10.1109/EPC.2008.4763383.
10. Modeling and Simulation for Traction Power Supply System of High-Speed Railway / Han Zhengqing, Zhang Yuge, Liu Shuping et al. // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2011. DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5748640.
11. Lei Xue, Xiaoqing Han, Shuying Li. Influence of traction transformer with different connection forms on power quality of the grid // 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2018. DOI: 10.1109/EI2.2018.8582113.
12. Alexander Cherepanov, Anton Kutsiy. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). DOI:10.1007/978-3-319-70987-1_10.

13. Xishan Yu. General Mathematical Model of AC Traction Power Supply System Simulation Based on Mathematical Reasoning and Its Application Research // IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS). 2020. | DOI: 10.1109/ICAIS49377.2020.9194938.
14. Modelling on Novel Cable Traction Power Supply System and Power Distribution Analysis / Zhang Liyan, Liang Shiwen, Li Xin et al. // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3069980.
15. Study on new traction power supply system for power quality comprehensive compensation in electrified railway / Chen Minwu, Luo Jie, Jiang Wenbing et al. // TENCON 2015. 2015 IEEE Region 10 Conference. 2015. DOI: 10.1109/TENCON.2015.7372869.
16. Railway Traction Supply with PV integration for Power Quality Issues / Mohamed Rageh, Auguste Ndtoungou, Abdelhamid Hamadi et al. // IECON 2018 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2018. DOI: 10.1109/IECON.2018.8591768.
17. Nezevak V., Cheremisin V. Prediction of Bandwidth Increase of Railways Areas at the Change Expense of The Direct Current Traction Power Supply System Characteristics by Implementation of Electric Storage Units // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216295.
18. The Unbalanced Modes Analyze Of Traction Loads Network / U. Bumtsend; M. Safaraliev; A. Ghulomzoda et al. // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). 2020. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117758.
19. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. 2005. 273 с.
20. Бужакова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление. Ангарск: Изд-во АНГТУ, 2018. 382 с.

References

1. Kotelnikov A.V. Elektrifikaciya zhelezny`x dorog [Railway electrification]. Mirovy`e tendencii i perspektivy` [Global trends and prospects]. Moscow: Intekst Publ., 2002. 104 p.
2. Kotelnikov A.V., Nestraxov A.S. Zheleznodorozhny`j transport Rossii v 2000–2030 gg. (nauchnaya koncepciya) [Railway transport in Russia in 2000–2030 (scientific concept)]. Vestnik VNIIZhT [VNIIZHT Bulletin], 2000, No. 5, pp. 3–15.
3. Kotelnikov A., Glonti A. Word trends in the development of railway electrification. Rail International, 2001, pp. 26–35.
4. Badyor M.P., In`kov Yu.M., Rozenberg E.N. E`nergoberegayushhie tehnologii intellektual`nogo zheleznodorozhnogo transporta [Energy-saving technologies of intelligent railway transport]. Electronics and electrical equipment of transport [E`lektronika i e`lektooborudovanie transporta], 2012, No. 4, pp. 36–43.
5. Kotelnikov A.V., Lisicyn A.L., By`kov V.A. Perspektivy` razvitiya e`lektrifikacii zhelezny`x dorog Rossii i zadachi e`lektrotexnicheskoy promy`shlennosti po ee obespecheniyu [Prospects for the development of electrification of Russian railways and the tasks of the electrical industry to ensure it]. E`lektrika [Electro], 2001, No.2, pp. 2–4.
6. Vasilyanskij A.M., Mamoshin R.R., Yakimov G.B. Sovershenstvovanie sistemy` tyagovogo e`lektrosnabzheniya zhelezny`x dorog, e`lektificirovanny`x na peremennom toke 27,5 kV, 50 Gcz [Improvement of the traction power supply system for railways electrified with alternating current of 27.5 kV, 50 Hz]. Zhelezny`e dorogi mira [Railways of the world], 2002, No. 8, pp. 40–46.
7. Kotelnikov A.V., Kosarev A.B., Polishkina I.I. E`lektromagnitnaya bezopasnost` sistem tyagovogo e`lektrosnabzheniya pov`shennogo napryazheniya [Electromagnetic safety of high-voltage traction power supply systems]. Vestnik VNIIZhT [VNIIZHT Bulletin], 2002, No. 6, pp. 10–14.
8. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC'09. Kyoto, 2009, pp. 567–570.
9. Gao Lin, Xu Yonghai, Xiao Xiangnin, Liu Yingying, Jiang Peisi. Analysis of adverse effects on the public power grid brought by traction power-supply system. 2008 IEEE Canada Electric Power Conference. 2008. Publisher: IEEE.
10. Zhengqing Han, Yuge Zhang, Shuping Liu, Shibin Gao. Modeling and Simulation for Traction Power Supply System of High-Speed Railway. 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference: 2011. Publisher: IEEE.
11. Lei Xue, Xiaoqing Han, Shuying Li. Influence of traction transformer with different connection forms on power quality of the grid. 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2018. Publisher: IEEE.
12. Alexander Cherpanov, Anton Kutsiy. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). | Publisher: IEEE.
13. Xishan Yu. General Mathematical Model of AC Traction Power Supply System Simulation Based on Mathematical Reasoning and Its Application Research. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS). 2020. Publisher: IEEE
14. Liyan Zhang, Shiwen Liang, Xin Li, Ying Jia. Modelling on Novel Cable Traction Power Supply System and Power Distribution Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. Publisher: IEEE.
15. Minwu Chen, Jie Luo, Wenbing Jiang, Yaowu Wang. Study on new traction power supply system for power quality comprehensive compensation in electrified railway. TENCON 2015. 2015 IEEE Region 10 Conference. 2015. Publisher: IEEE.
16. Mohamed Rageh, Auguste Ndtoungou, Abdelhamid Hamadi, Kamal Al-Haddad. Railway Traction Supply with PV integration for Power Quality Issues. IECON 2018 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2018. Publisher: IEEE.

17. Vladislav Nezevak, Vasyliy Cheremisin. Prediction of Bandwidth Increase of Railways Areas at the Change Expense of The Direct Current Traction Power Supply System Characteristics by Implementation of Electric Storage Units. 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020. Publisher: IEEE.

18. Uyangasaikhan Bumtsend, Murodbek Safaraliev, Anvari Ghulomzoda, Bakhtiyor Ghoziev, Javod Ahyoev, Ghulomabdol Ghulomabdolov. The Unbalanced Modes Analyze Of Traction Loads Network. 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). 2020. Publisher: IEEE.

19. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonessimmetrichny`e rezhimy` e`lektricheskix system [Complex-symmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkutsk University Publ., 2005. 273 p.

20. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. E`lektromagnitnaya bezopasnost` v sistemax e`lektrosnabzheniya zhelezny`x dorog: modelirovanie i upravlenie [Electromagnetic safety in railway power supply systems: modeling and management]. Angarsk: AnGTU Publ., 2018. 382 p.

Информация об авторах

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения; Иркутский национальный исследовательский технический университет, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Черепанов Александр Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: santela89@mail.ru

Степанов Андрей Дмитриевич – канд. техн. наук, доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: stepanov_andrey_1978@mail.ru.

Середкин Дмитрий Александрович – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: dmitriy987@mail.ru

Фесак Илья Анатольевич – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: fesakilya@yandex.ru

Information about the authors

Andrej V. Kryukov – Doctor of Engineering Science, Professor, Irkutsk State Transport University; Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Aleksandr V. Cherepanov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: santela89@mail.ru

Andrej D. Stepanov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: stepanov_andrey_1978@mail.ru

Dmitriy A. Seredkin – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: dmitriy987@mail.ru

Ilya A. Fesak – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: fesakilya@yandex.ru

Совершенствование системы поддержки жизненного цикла локомотивов

Ю. А. Давыдов✉, О. О. Мухин, В. В. Заболотный

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ puch@festu.khv.ru

Резюме

В настоящее время в России распространяется практика применения контракта жизненного цикла, который предусматривает проектирование, строительство, закупку продукции, ее дальнейшее обслуживание, ремонт и утилизацию. Порядка 80 % всех реализуемых проектов на основе контракта жизненного цикла относятся к транспортной отрасли, однако также контракт успешно применяется в сферах здравоохранения, культуры и спорта. Один из первых проектов с использованием новой концепции – закупка ОАО «РЖД» высокоскоростных поездов «Сапсан» у компании Siemens. Другим примером может стать – Московский метрополитен, заключивший договор с ПАО «Метровагонмаш» на поставку подвижного состава. Как показывает мировой опыт, применение долгосрочного контракта позволяет лучше планировать деятельность, дает возможность оптимизировать издержки, делает предсказуемой инвестиционную программу и сроки ее окупаемости. Кроме того, появляется возможность поступательно и планомерно развивать инженерную компетенцию организации, поскольку по мере анализа статистики отказов происходит обновление и модернизация поставляемой продукции. Данная концепция применена и в локомотивном комплексе, в рамках договора на поставку локомотивов с обязательством обеспечения их сервисного обслуживания, заключенного между АО «Рослокомотив» и ОАО «РЖД», организован ввод в эксплуатацию новых электропоездов серии «Ермак». Контрактом предусмотрено участие ремонтной компании и завода-изготовителя с целью поддержки качества продукции. В статье рассмотрена текущая организация системы поддержки жизненного цикла локомотивов, предложено направление совершенствования – разработка научно обоснованной методики долгосрочного планирования программы ремонта. С применением информационных систем ОАО «РЖД» проведен анализ динамики среднесуточного пробега ЗЭС5К приписки эксплуатационных локомотивных депо Дальневосточной дирекции тяги: рассмотрены влияющие сезонные факторы, определена тенденция роста пробега. Проведен гармонический анализ методом Фурье и предложена функция, описывающая динамику среднесуточного пробега с учетом сезонных колебаний. Разработанная методика позволит более точно определить потребность локомотивов в сервисном обслуживании.

Ключевые слова

контракт жизненного цикла, жизненный цикл, локомотив «Ермак», среднесуточный пробег, организация ремонта, программа ремонта, метод Фурье, прогнозирование

Для цитирования

Давыдов Ю. А. Совершенствование системы поддержки жизненного цикла локомотивов / Ю. А. Давыдов, О. О. Мухин, В. В. Заболотный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 92–101. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).92-101

Информация о статье

поступила в редакцию: 21.08.2021, поступила после рецензирования: 29.08.2021, принята к публикации: 14.09.2021

Improvement of the locomotive life cycle support system

Yu. A. Davydov✉, O. O. Mukhin, V. V. Zabolotnyy

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ puch@festu.khv.ru

Abstract

Currently, the practice of applying a life cycle contract is spreading in Russia, suggesting the design, construction, purchase of products, their further maintenance, repair and disposal. 80 % of all projects implemented on the basis of a life cycle contract relate to the transport industry, but the contract is also successfully applied in the fields of healthcare, culture and sports. One of the first projects using the new concept is the purchase of high-speed «Sapsan» trains from Siemens by Russian Railways. Another example is the Moscow Metro, which has signed a contract with PJSC «Metrovagonmash» for the rolling stock supply. As is shown by the worldwide practice, the use of a long-term contract allows to better plan one's activities, allowing to optimize costs and making the investment program and its payback period predictable. Besides, an opportunity appears to progressively and systematically develop their engineering competence, since according to the failure statistics analyses, the supplied products are updated and modernized. This concept has been applied in the locomotive complex, within

the contract for the supply of locomotives with the obligation to ensure their service, between JSC «Roslokomotiv» and JSC «Russian Railways», the commissioning of new electric locomotives of the «Ermak» series has been organized. The contract provides for the participation of a repair company and a manufacturer in order to support the quality of products. The article considers the current organization of the locomotive life cycle support system, suggests the direction of improvement – the development of a scientifically based methodology for long-term planning of the repair program. Using the information systems of JSC «Russian Railways», the analysis of the average daily mileage dynamics of 3ES5K registered in the operational locomotive depots of the Fareastern traction directorate was carried out – the influencing seasonal factors were considered, the growth trend determined. A harmonic analysis is performed by the Fourier method and a function is proposed describing the dynamics of the average daily mileage, considering seasonal fluctuations. The developed methodology will allow a more accurate determination of the need for locomotive maintenance.

Keywords

life cycle contract, life cycle, locomotive «Ermak», average daily mileage, repair organization, repair program, Fourier method, forecasting

For citation

Davydov Yu. A., Mukhin O. O., Zabolotny V. V. Sovershenstvovanie sistemy podderzhki zhiznennogo tsikla lokomotivov [Improvement of the locomotive life cycle support system]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 92–101. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).92-101

Article info

Received: 21.08.2021, Revised: 29.08.2021, Accepted: 14.09.2021

Введение

В 2018 г. между ОАО «РЖД» и АО «Рослокомотив» заключен контракт жизненного цикла (далее – КЖЦ) на поставку и обеспечение сервисного обслуживания новых локомотивов серии «Ермак».

КЖЦ – договор, предусматривающий создание и закупку продукции, предоставление услуг по обеспечению использования, эксплуатации и ремонта продукции в течение всего срока ее службы, а также последующую ее утилизацию. В рамках КЖЦ поставщик в лице АО «Рослокомотив» обязуется обеспечить изготовление локомотивов в соответствии с заявленными техническими условиями, с параметрами надежности и эффективности. Также в рамках КЖЦ АО «Рослокомотив» организует выполнение гарантийного и сервисного обслуживания локомотивов силами заводов-изготовителей и сервисной компании ООО «ЛокоТех-Сервис».

Жизненный цикл тягового подвижного состава

В соответствии с национальным стандартом жизненный цикл (далее – ЖЦ) представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов изменения состояния продукции при ее создании, использовании или эксплуатации и ликвидации. ЖЦ подвижного состава принято разделять на пять стадий, которые характеризуются спецификой направленности работ, производимых на этой стадии, и результатами: разработка, производство, модернизация, эксплуатация и утилизация.

В настоящее время на Дальневосточной железной дороге происходит обновление локомотивного парка, эксплуатируемого в границах Транссибирской магистрали. Так с января 2020 г. в рамках КЖЦ в структурные подразделения Дальневосточ-

ной дирекции тяги осуществлена поставка магистральных электровозов серии 3ЭС5К.

На рис. 1 представлена блок-схема процесса эксплуатации новых локомотивов в рамках КЖЦ [1–4]. Стадия эксплуатации – это стадия применения тягового подвижного состава по назначению с поддержанием и восстановлением его качества [1–3]. Эксплуатация делится на два процесса: эксплуатационная работа, которую осуществляют региональные дирекции тяги и их структурные подразделения, и сервисное обслуживание – производят сервисные и ремонтные локомотивные депо, локомотиворемонтные заводы и гарантийные центры локомотивостроительных заводов [1–3].

Организация системы поддержки жизненного цикла

На рис. 2 представлена блок-схема процесса организации системы поддержки ЖЦ локомотивов [4, 5]. Для выполнения процесса необходимыми ресурсами являются: локомотивы, находящиеся на КЖЦ; информационные системы ОАО «РЖД»; материально-техническая база сервисных локомотивных депо; нормативные документы и технологические инструкции, регламентирующие выполнения ремонтных операций [5].

Продуктом сервисного обслуживания являются технически исправные локомотивы, отвечающие заданным требованиям надежности.

Производителями процесса выступают сервисное локомотивное депо, гарантийные центры заводов-изготовителей локомотивов и их ремонтный персонал.

Ключевые показатели процесса являются: выполнение комплексных показателей надежности

локомотивов, установленных договорными отношениями и техническими условиями.

Основной задачей процесса является выполнение качественного ремонта, технического обслуживания локомотивов. Общими целями локомотивного блока являются обеспечение работоспособности технических средств и обеспечение бесперебойной эксплуатации.

В процессе организации системы поддержки ЖЦ существуют следующие риски:

- неверная оценка остаточного ресурса узлов и агрегатов;
- недостаточная надежность узлов и агрегатов;
- некачественное планирование сервисного обслуживания;
- плановое уменьшение объемов ремонтных работ;
- длительный простой в ожидании ремонта, нехватка ремонтных позиций;
- увеличение объема сверхцикловых работ;
- некачественное сервисное обслуживание, невыполнение в полном объеме цикловых работ;
- отсутствие запасных частей и линейного оборудования.

Ежегодно для минимизации рисков в локомотиворемонтных и строительных компаниях разраба-

тываются мероприятия, которые на протяжении всего года контролируются инспекторами по приемке локомотивов региональных дирекций тяги, работниками отдела планирования и контроля ремонта локомотивов эксплуатационных локомотивных депо.

По итогам анализа рисков в системе поддержки ЖЦ определено направление совершенствования – разработка методики долгосрочного планирования программы ремонта локомотивов, что позволит рассчитать потребность и распределить между сервисными организациями количество выполняемых цикловых работ, с учетом мощностей и оснащенностью депо; определить рациональный интервал между вводом в эксплуатацию новых поставляемых локомотивов для равномерного распределения программы ремонта в будущем; определить реальный срок службы агрегатов, чей срок нормирован пробегом; произвести более точный расчет стоимости ЖЦ.

Анализ динамики среднесуточного пробега локомотивного парка

В качестве объекта исследования системы поддержки ЖЦ на стадии эксплуатации выступают электровозы серии ЗЭС5К приписки Дальневосточной дирекции тяги.

Количество цикловых работ на всем ЖЦ за-

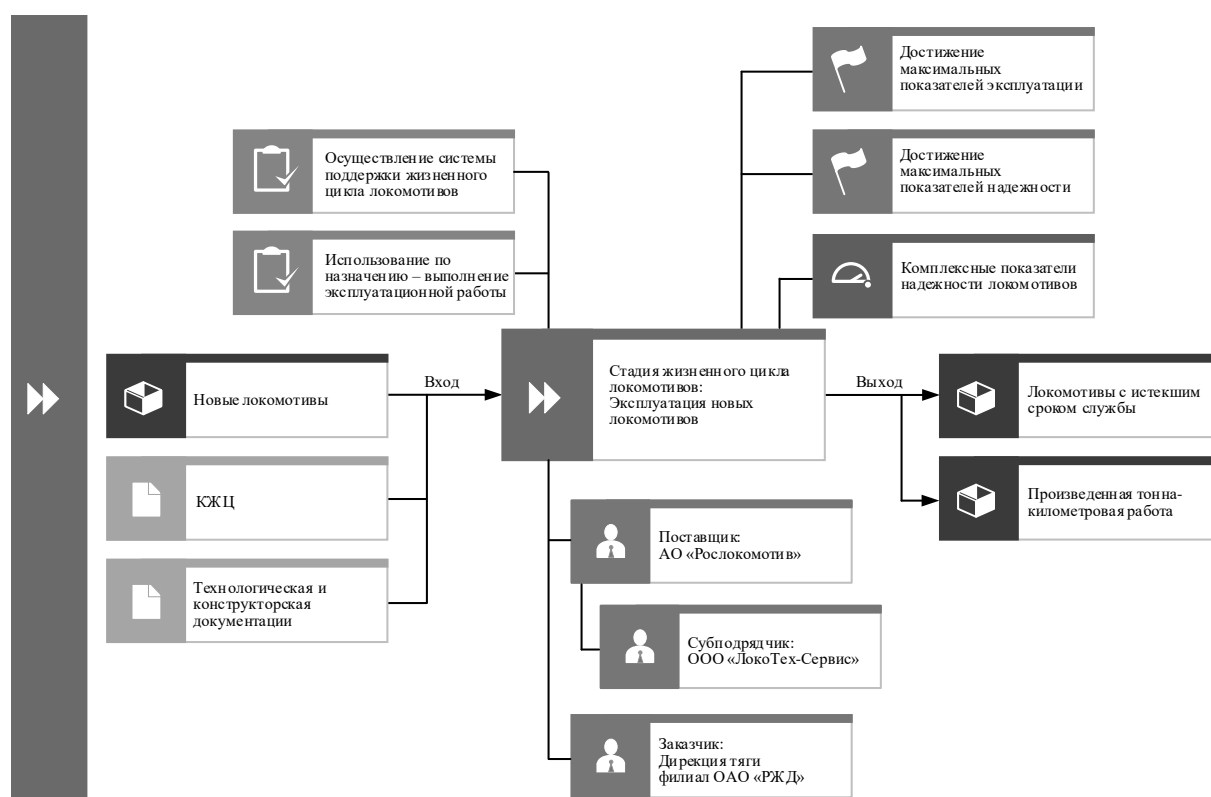


Рис. 1. Блок-схема процесса эксплуатации новых локомотивов в рамках контракта жизненного цикла

Fig. 1. Block diagram of the operation process of new locomotives within the framework of the LCC

висит от пробега локомотивов. В свою очередь, среднесуточный пробег локомотивов зависит от выполнения показателей участковой скорости движения. Как таковой постоянной ограничивающей скорости на участках не существует, с каждым годом разрабатываются организационно-технические мероприятия, новые технологии движения.

На рис. 3 представлена блок-схема факторов, влияющих на среднесуточный пробег. Основные

факторы:

- отказы технических средств (далее – ОТС) – количество допущенных ОТС на линии; длительность простоя на линии по причине ОТС; длительность пересылок локомотивов в недействующем состоянии по причине ОТС до ремонтного предприятия; длительность простоя на ремонте после допущенного ОТС; длительность простоя локомотивов по причине неисправности контактной сети, желез-

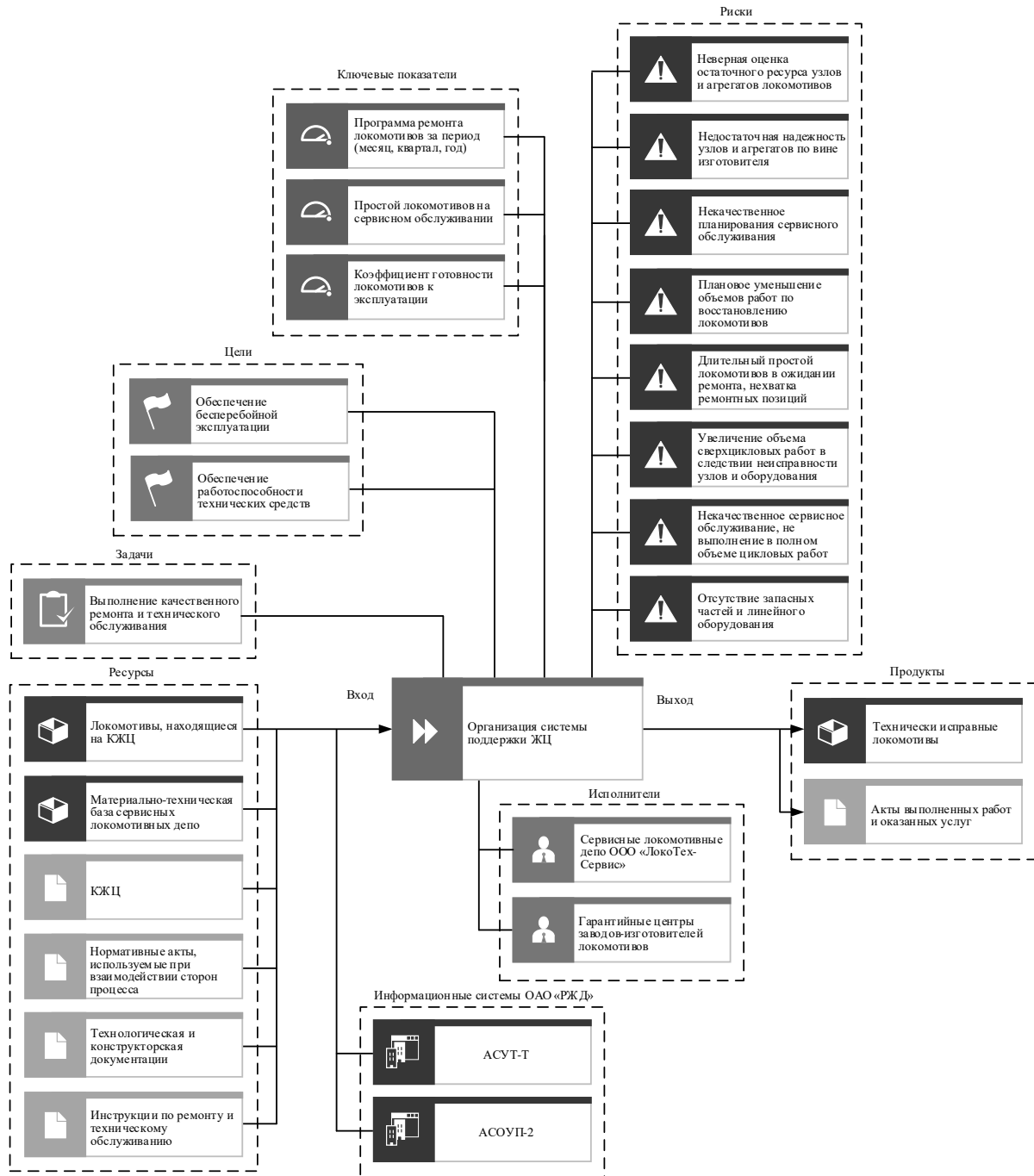


Рис. 2. Блок-схема процесса организации системы поддержки жизненного цикла локомотивов

Fig. 2. Block diagram of the process of organizing a LC support system

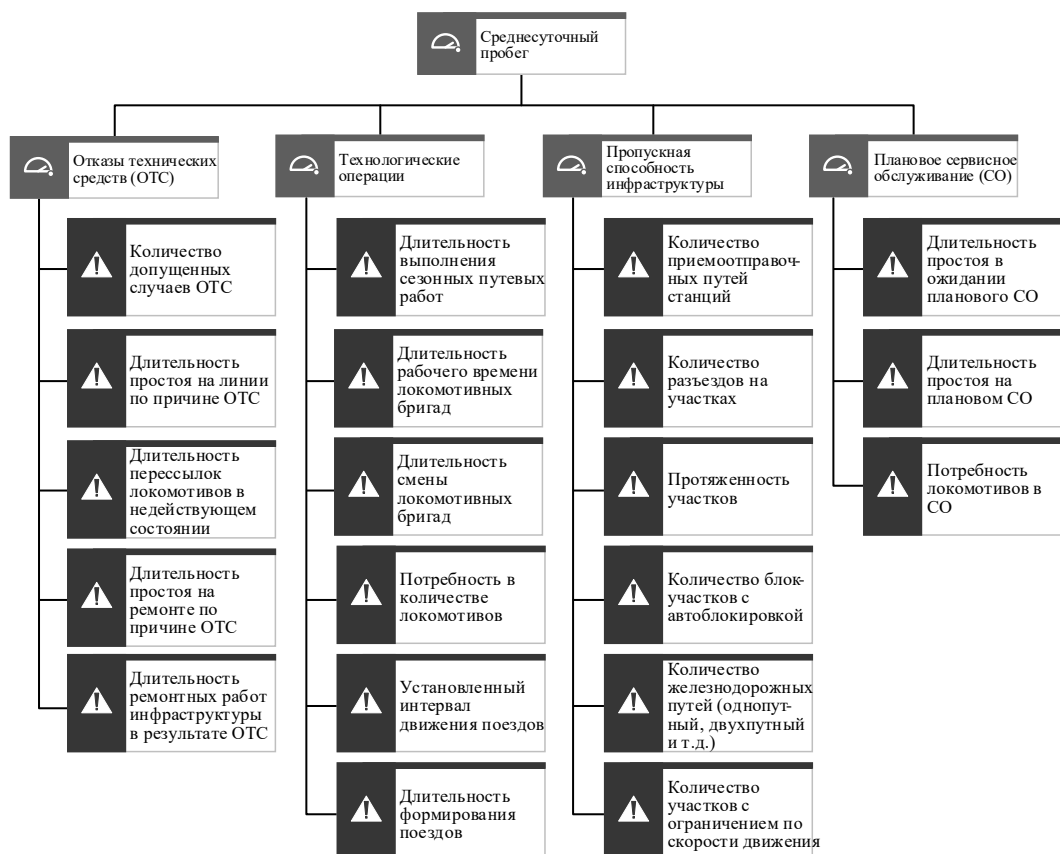


Рис. 3. Блок-схема факторов, влияющих на среднесуточный пробег

Fig. 3. Block diagram of factors affecting the average daily mileage

Динамика среднесуточного пробега локомотивов серии 3ЭС5К

Dynamics of the average daily mileage of locomotives of the 3ES5K series

Месяц	Год						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	Среднесуточный пробег, км/сут						
Январь	566,63	540,45	547,41	583,71	627,94	595,62	603,67
Февраль	562,52	561,08	556,64	580,57	600,91	558,50	591,05
Март	552,13	581,76	552,12	596,05	612,63	545,36	605,99
Апрель	548,26	561,00	550,83	574,14	587,68	539,72	545,42
Май	518,63	525,88	530,34	555,83	565,10	530,63	562,46
Июнь	524,77	527,88	506,82	551,17	576,51	546,88	540,87
Июль	537,76	527,48	498,83	550,33	557,61	507,37	–
Август	520,89	520,40	494,86	569,38	533,12	492,81	–
Сентябрь	497,97	514,84	516,51	559,54	558,51	542,76	–
Октябрь	517,03	541,68	529,49	566,91	563,43	564,16	–
Ноябрь	511,43	566,08	567,47	595,67	572,08	565,97	–
Декабрь	549,91	561,71	543,39	575,18	526,40	576,82	–

нодорожных путей в результате ОТС;

– технологические операции – длительность выполнения сезонных путевых работ; длительность рабочего времени локомотивных бригад; длительность смены локомотивных бригад; количество используемых в поездной работе локомотивов; соблю-

дение интервала движения поездов; продолжительность формирования поездов;

– пропускная способность инфраструктуры – количество приемоотправочных путей станций, разъездов на участках, блок-участков с автоблокировкой; протяженность участков; количество однопутных, двухпутных и многопутных железнодорож-

ных путей; количество опасных участков с ограничением по скорости движения;

– плановое сервисное обслуживание – длительность простоя в ожидании обслуживания; длительность простоя на обслуживании; количество локомотивов, подлежащих плановому обслуживанию [6–8].

Указанные факторы вызывают случайные и сезонные колебания в динамике среднесуточного пробега. Сезонность наносит ущерб деятельности компании ОАО «РЖД», изучение сезонных колебаний необходимо для обеспечения более ритмичной работы локомотивного комплекса.

В табл. и на рис. 4 представлена динамика среднесуточного пробега рабочего парка локомотивов серии ЗЭС5К приписки эксплуатационных локомотивных депо Хабаровск-II и Смоляниново за период с января 2015 по июнь 2021 г.

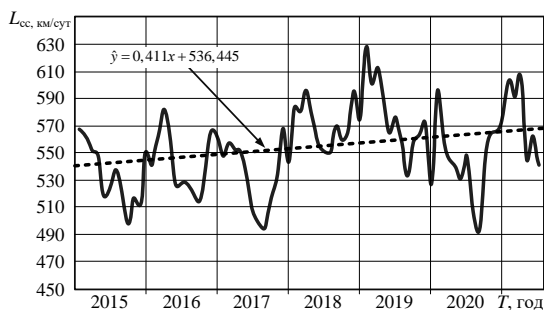


Рис. 4. Динамика среднесуточного пробега локомотивов серии ЗЭС5К

Fig. 4. Dynamics of the average daily mileage of locomotives of the ZES5K series

Представленная динамика подтверждает наличие сезонных колебаний – снижение среднесуточного пробега происходит в летнее время года, а увеличение – в зимнее, также имеются случайные колебания.

Для прогнозирования динамики среднесуточного пробега, подобрана линия тренда, пунктирная линия на графике (см. рис. 4), на основании которой справедливо утверждать, что среднесуточный пробег в будущем будет расти. Тогда с его увеличением количество цикловых ремонтных работ будет расти на всем ЖЦ локомотива [9, 10].

Для дальнейших расчетов в качестве уравнения тренда принимается полином первой степени:

$$\hat{y} = 0,411x + 536,445, \quad (1)$$

где \hat{y} – значение среднесуточного пробега в соответствующем месяце, км/сут; x – искомый параметр времени, порядковый номер месяца.

Рост среднесуточного пробега обусловлен развитием железнодорожной инфраструктуры Дальневосточного региона и технологий: электрификация участков Волочаевка-II – Комсомольск-на-

Амуре – Советская Гавань; прокладка третьего пути Транссибирской магистрали; развитие приемоотправочных парков; увеличение разъездов; внедрение технологии «виртуальной автосцепки» на всем локомотивном парке, эксплуатируемом в границах Восточного полигона [6–8].

Разработка модели прогноза среднесуточного пробега

При исследовании и описании сезонности динамики целесообразно использовать гармонический анализ по методу Фурье, уравнение выглядит следующим образом:

$$Y_k t = a_0 + \sum_{k=1}^{T/2} \left(a_k \cos \frac{2\pi k t}{T} + b_k \sin \frac{2\pi k t}{T} \right), \quad (2)$$

где a_0 , a_k , b_k – неизвестные параметры Фурье, которые находятся по методу наименьших квадратов; k – гармоника ряда ($k \leq T/2$); T – период колебаний, для описания сезонности гармониками Фурье временной параметр необходимо перевести в радианную меру [11–17]. Коэффициенты Фурье a_0 , a_k , b_k определяются при помощи метода наименьших квадратов из следующих соотношений:

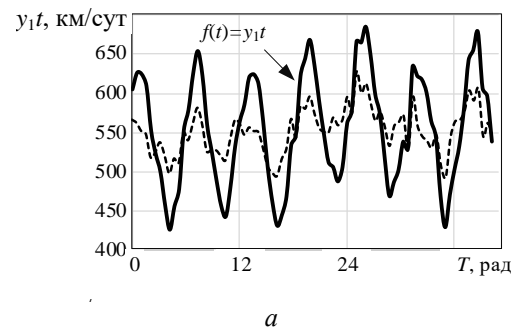
$$a_k = \frac{2}{T} \sum_{t=0}^{\frac{\pi}{6}} y \cos k t; \quad (3)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \sum_{t=0}^{\frac{\pi}{6}} y \sin k t; \quad (4)$$

$$a_0 = \frac{\sum y}{T}, \quad (5)$$

где y – исходное значение среднесуточного пробега в соответствующем месяце, км/сут.

Представленный временной ряд (см. табл.) имеет протяженность в 78 значений, соответственно $T = 78$, а количество гармоник k должно быть принято не более $T/2$. По результатам расчета по формулам (1)–(5) получено множество гармоник. На рис. 5 представлены графики первых трех гармоник, пунктирная линия характеризует исходные данные о среднесуточном пробеге.



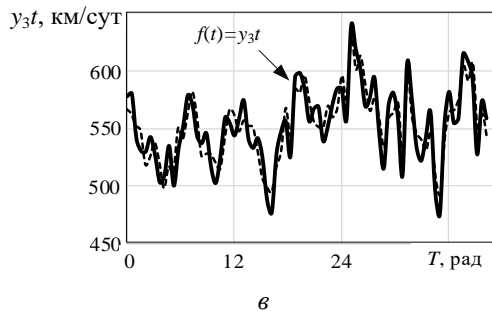
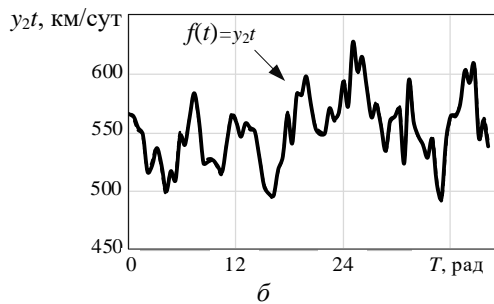


Рис. 5. Графики гармоник, полученных по методу Фурье:
 а – первая гармоника; б – вторая гармоника;
 в – третья гармоника

Fig. 5. Graphs of harmonics obtained by the Fourier method:

а – first harmonic; б – second harmonic;
 в – third harmonic

В общем виде модель прогноза среднесуточного пробега локомотивов, поставляемых в 2021 г., на всем ЖЦ с июля 2021 по 2054 г., выглядит следующим образом:

$$y_k t = \hat{y} + \sum_{k=1}^{T/2} (a_k \cos kt + b_k \sin kt), \quad (6)$$

где \hat{y} – соответствует уравнению тренда по формуле (1), тогда формула (6) примет вид

$$y_k t = 0,411t + 536,445 + \sum_{k=1}^{T/2} (a_k \cos kt + b_k \sin kt).$$

С помощью подбора различных гармоник и их совмещения между собой достигнут прогноз с

наиболее схожими с анализируемой динамикой колебаниями [18, 19]. В итоге функция для прогнозирования среднесуточного пробега на 33 года вперед, включающая в себя гармоники со второй по седьмую, имеет вид:

$$Yt = 0,411t + 536,445 + \sum_{k=2}^7 (a_k \cos kt + b_k \sin kt). \quad (7)$$

На рис. 6 представлен прогноз динамики среднесуточного пробега на 33 года вперед.

Прогнозирование цикловых работ

Плановые работы по техническому обслуживанию и текущему ремонту включают в себя: техническое обслуживание в объеме ТО-1, ТО-2, ТО-4, ТО-5, текущие ремонты ТР-1, ТР-2, ТР-3, средний (СР) и капитальный ремонты (КР). Согласно руководству по эксплуатации магистральных электровозов серии «Ермак», межремонтный пробег при ТР-1 составляет 50 тыс. км, для ТР-2 – 250 тыс. км, ТР-3 – 500 тыс. км, СР – 100 тыс. км, КР – 1 млн км. Кроме того, предусмотрен допуск постановки локомотивов на сервисное обслуживание $\pm 5\%$ [20–22].

Для расчета количества цикловых работ на всем ЖЦ локомотивов серии ЗЭС5К необходимо найти интеграл функции (7). Интегрирование позволит определить полный линейный пробег локомотива:

$$L_{\text{лин}} = \frac{D}{T} \int_{t_0}^T Yt dt,$$

где T – период, рад; D – период, календарные дни; t_0 – начало эксплуатации локомотива, рад.

По итогам интегрирования линейный пробег локомотива составит 7 млн 186 тыс. 100 км.

Для каждого вида ремонта его количество на всем ЖЦ будет рассчитываться следующим образом:

– капитальный ремонт

$$n_{\text{КР}} = \frac{L_{\text{лин}}}{L_{\text{КР}}}; \quad (8)$$

– средний ремонт

$$n_{\text{СР}} = \frac{L_{\text{лин}}}{L_{\text{СР}}} - n_{\text{КР}}; \quad (9)$$

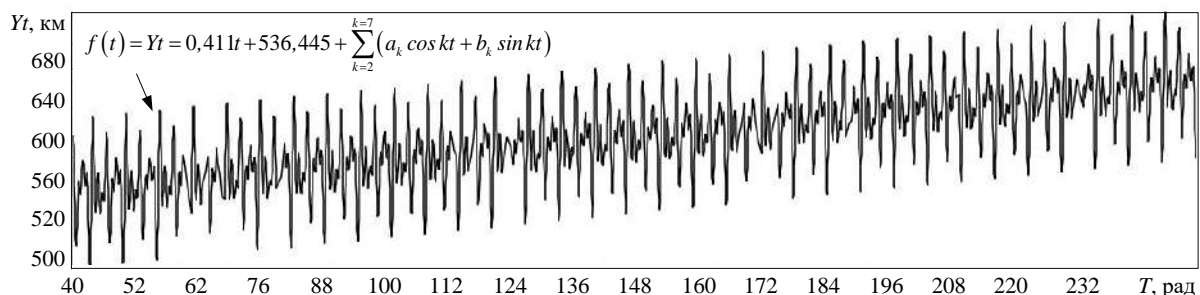


Рис. 6. График прогноза динамики среднесуточного пробега на 33 года вперед
Fig. 6. Fourier time series of the average daily mileage of locomotives for 33 years ahead

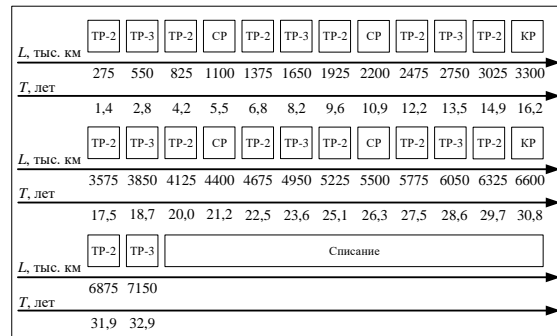


Рис. 7. График распределения цикловых ремонтных работ в границах жизненного цикла с учетом роста среднесуточного пробега до 2054 г.

Fig. 7. Schedule of distribution of cycle repair work within the boundaries of the life cycle of a locomotive 3ES5K considering the growth of the average daily mileage until 2054

– текущий ремонт в объеме ТР-3

$$n_{\text{ТР-3}} = \frac{L_{\text{лиш}}}{L_{\text{ТР-3}}} - (n_{\text{КР}} + n_{\text{СР}}) ; \quad (10)$$

– текущий ремонт в объеме ТР-2

$$n_{\text{ТР-2}} = \frac{L_{\text{лиш}}}{L_{\text{ТР-2}}} - (n_{\text{КР}} + n_{\text{СР}} + n_{\text{ТР-3}}) ; \quad (11)$$

– текущий ремонт в объеме ТР-1

$$n_{\text{ТР-1}} = \frac{L_{\text{лиш}}}{L_{\text{ТР-1}}} - (n_{\text{КР}} + n_{\text{СР}} + n_{\text{ТР-3}} + n_{\text{ТР-2}}) , \quad (12)$$

где $L_{\text{КР}}$, $L_{\text{СР}}$, $L_{\text{ТР-3}}$, $L_{\text{ТР-2}}$, $L_{\text{ТР-1}}$ – межремонтный пробег для соответствующего объема цикловых работ (км) [23].

По итогам расчета по формулам (9)–(12) в рамках ЖЦ одного локомотива будут проведены цикловые работы в объеме КР 2 раза, в объеме СР – 4 раза, ТР-3 – 7, ТР-2 – 13, ТР-1 – 104.

На рис. 7 представлен график распределения цикловых ремонтных работ в границах ЖЦ одного локомотива с учетом изменения динамики среднесуточного пробега до 2054 г.

Заключение

Методика определения объемов сервисного обслуживания на всем ЖЦ с учетом изменения среднесуточного пробега применима для любых серий локомотивов. Методика позволит в перспективе:

- определить рациональный интервал между вводом в эксплуатацию новых локомотивов, тем самым в будущем обеспечить равномерную поставку локомотивов на ремонтные позиции, что повысит вероятность выполнения заданного показателя коэффициента готовности локомотивов к эксплуатации, снизит длительный простой на ремонте и в ожидании ремонта;

- определить потребность локомотивного парка в плановых видах ремонта, что даст возможность рационального распределения их по сервисным организациям;

- оценить отклонение выполнения программы ремонта локомотив и определить стратегию совершенствования электровозов;

- определить срок работы узлов и агрегатов локомотивов, срок службы которых нормирован по линейному пробегу, обеспечить план по их замене;

- определить стоимость планового сервисного обслуживания локомотивов на всем ЖЦ.

Список литературы

1. ГОСТ Р 83791-2010. Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения. Введ. 2011-01-01. М. : Стандартинформ, 201815 с.
2. ГОСТ 31539-2012. Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава. Термины и определения. Введ. 2014-01-01. М. : Стандартинформ, 201414 с.
3. ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. Введ. 2015-09-01. М. : Стандартинформ, 201634 с.
4. Свод правил моделирования бизнес-архитектуры и бизнес-процессов ОАО «РЖД» : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 8 окт. 2019 г. № 2227р.
5. Регламент взаимодействия дежурного по эксплуатационному локомотивному депо, приемщика локомотивов дирекции тяги и диспетчера сервисного локомотивного депо в информационных системах ОАО «РЖД» : утв. распоряжением от 20 нояб. 2018 г. № 2438р.
6. Бернгард К.А., Фельдман Э.Д. Комплексная оценка развития пропускной и провозной способности сети железных дорог // Вестник ВНИИЖТ. 1983. № 4. С. 1–4.
7. Белецкий А.Н. Перевозочному процессу – высокую ритмичность // Железнодорожный транспорт. 1984. № 12. С. 17–21.

8. Баранов А.Л. Управление тяговыми ресурсами на Восточном полигоне // Железнодорожный транспорт. 2014. № 6. С. 25–31.
9. Сажин Ю.В., Катунь А.В., Сарайкин Ю.В. Анализ временных рядов и прогнозирование. Саранск : Мордов. ун-т. 2013. 192 с.
10. Химмельблау Д. Анализ процессов статическими методами М. : Мир. 1973. 957 с.
11. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М. : Наука. 1968. 289 с.
12. Теория прогнозирования и принятия решений / С.А. Саркисян, В.И. Каспин, В.А. Лисичкин и др. М. : Высшая школа. 1997. 351 с.
13. Фенкель А.А. Математические методы анализа динамики и прогнозирования производительности труда. М. : Экономика, 1972. 190 с.
14. Shmueli, G. Kenneth C., Lichtendahl Jr. Practical Time Series Forecasting with R: A Hands-On Guide (Practical Analytics). International Kindle paperwhite, 2016. 232 p.
15. Chatfield C. Time-Series Forecasting. USA : Chapman and Hall/CRC, 2001. 280 p.
16. Bisgaard S. Kulahci M. Time Series Analysis and Forecasting by Examl. USA : Wiley, 2011. 400 p.
17. Harvey A. Forecasting, Structural Time Series Models and the Kalman Filter. London : Cambridge University Press. 2014. 676 p.
18. Дьяконов В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах. М. : ДМК Пресс. 2011. 800 с.
19. Дьяконов В.П. Энциклопедия компьютерной алгебры. Mathcad, Maple, Mathematica, Drive, MuPAD. Аналитические и численные вычисления и их визуализация. Сотни примеров математических расчетов. М. : ДМК Пресс. 2010. 1268 с.
20. ОАО «РЖД» Нормы межремонтных пробегов железнодорожного подвижного состава, эксплуатируемого на инфраструктуре: утв. распоряжением 11 августа 2016 г. № 1651/р.
21. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К, 4ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Кн. 8. Техническое обслуживание и ремонт. Новочеркасск. 2019. 291 с.
22. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К, 4ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Кн. 1. Описание и работа. Электрические схемы. Новочеркасск. 2006. 251 с.
23. Методика расчета потребности в заводских и депоовских ремонтах локомотивов ОАО «РЖД». Расчет Р1881 РР : утв. распоряжением от 6 февр. 2019 г. № 198р.

References

1. GOST R 83791-2010 Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Resursoberezheniye. Stadii zhiznennogo tsikla izdeliy proizvodstvenno-tekhnicheskogo naznacheniya. Obshchiye polozeniya. [National standard of the Russian Federation. Resource saving. Stages of the life cycle of products for industrial and technical purposes. General Provisions]. 01.01.2011. 15 p.
2. GOST 31539-2012 Tsikl zhiznennyy zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Terminy i opredeleniya. [Life cycle of railway rolling stock. Terms and Definitions]. 2014-01-01. 14 p.
3. GOST R 56136-2014 Upravleniye zhiznennym tsiklom produktsii voyennogo naznacheniya. Terminy i opredeleniya. [Life Cycle Management of Military Products. Terms and Definitions]. 2015-09-01. 34 p.
4. ОАО «РЖД». Svod pravil modelirovaniya biznes-arkhitektury i biznes-protsessov ОАО «РЖД» [Russian Railways JSC. The set of rules for modeling business architecture and business processes of Russian Railways: approved. by order of JSC Russian Railways]: utv. rasporyazheniyem ОАО «РЖД» ot 8 oktyabrya 2019 g. № 2227r [“Russian Railways” JSC. The set of rules for modeling business architecture and business processes of Russian Railways: approved. by order of JSC “Russian Railways” dated October 8, 2019 No. 2227r].
5. ОАО «РЖД» Reglamenta vzaimodeystviya dezhurnogo po ekspluatatsionnomu lokomotivnomu depo, priyemshchika lokomotivov di-rektsii tyagi i dispetchera servisnogo lokomotivnogo depo v informatsionnykh sistemakh ОАО «РЖД»: utv. rasporyazheniyem ot 20 noyabrya 2018 g. № 2438r [JSC “Russian Railways” Regulations for interaction of the duty officer for the operational locomotive depot, the receiver of the traction control locomotives and the dispatcher of the service locomotive depot in the information systems of JSC “Russian Railways”: approved. by order of November 20, 2018 No. 2438r].
6. Bernhard K.A., Feldman E. D. Kompleksnaya otsenka razvitiya propusknoy i provoznoy sposobnosti seti zheleznikh dorog [Comprehensive assessment of the development of throughput and carrying capacity of the railway network]. *Vestnik VNIIZHT [Bulletin of VNIIZHT]*, 1983, No. 4, pp. 1–4.
7. Beletskiy A.N. Perevozochnomu protsessu – vysokuyu ritmichnost' [Transportation process – high rhythm]. *Zheleznodorozhnyy transport [Railway transport]*, 1984, No. 12, pp. 17–21.
8. Baranov A.L. Upravleniye tyagovymi resursami na Vostochnom poligone [Traction resource management at the Eastern range]. *Zheleznodorozhnyy transport [Railway transport]*, 2014, No. 6, pp. 25–31.
9. Sazhin Yu.V., Katyn' A.V., Saraykin Yu.V. Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye [Time series analysis and forecasting]. Saransk: Mordov. un-ta, 2013. 192 p.
10. Khimmel'blau D. Analiz protsessov staticheskimi metodami [Analysis of processes by static methods]. Moskva: Mir Publ., 1973. 957 p.
11. Pustyl'nik, Ye.I. Statisticheskiye metody analiza i obrabotki nablyudeniya [Statistical methods of analysis and processing of observations]. Moskva: Nauka Publ., 1968. 289 p.
12. Sarkisyan S.A., Kaspin V.I., Lisichkin V.A., Minayev E.S., Pasechkin G.S. Teoriya prognozirovaniya i prinyatiya resheniy [Theory of forecasting and decision making]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1997. 351 p.
13. Fenkel' A.A. Matematicheskiye metody analiza dinamiki i prognozirovaniya proizvoditel'nosti truda [Mathematical methods of analysis of dynamics and forecasting of labor productivity]. Moskva: Ekonomika Publ., 1972. 190 p.

14. Shmueli G., Kenneth C., Lichtendahl Jr. Practical Time Series Forecasting with R: A Hands-On Guide (Practical Analytics). *International Kindle paperwhite: 2nd Edition.*, 2016. 232 p.
15. Chatfield C. Time-Series Forecasting. *Chapman and Hall / CRC: 1st Edition.*, 2001. 280 p.
16. Bisgaard S., Kulahci M. Time Series Analysis and Forecasting by Exampl. Wiley, 2011. 400 p.
17. Harvey A. Forecasting, Structural Time Series Models and the Kalman Filter. London School of Economics and Political Science: Cambridge University Press, 2014. 676 p.
18. D'yakonov V.P. Maple 10/11/12/13/14 v matematicheskikh raschetakh [Maple 10/11/12/13/14 in mathematical calculations]. Moskva: DMK Press, 2011. 800 p.
19. D'yakonov V.P. Entsiklopediya komp'yuternoy algebrы. Mathcad, Maple, Mathematica, Drive, MuPAD. Analiticheskiye i chislennyye vychisleniya i ikh vizualizatsiya. Sotni primerov matematicheskikh raschetov [Encyclopedia of Computer Algebra. Mathcad, Maple, Mathematica, Drive, MuPAD. Analytical and numerical calculations and their visualization. Hundreds of examples of mathematical calculations]. Moskva: DMK Press, 2010. 1268 p.
20. OAO "RZHD" Normy mezhremontnykh probegov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava, ekspluatiruyemogo na infrastrukture: utv. rasporyazheniyem 11 avgusta 2016 g. № 1651/r [JSC "Russian Railways" Standards of overhaul runs of railway rolling stock operated on the infrastructure: approved. by order of August 11, 2016 No. 1651 / r].
21. Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kniga 8. Tekhnicheskoye obsluzhivaniye i remont [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). Manual. Book 8. Maintenance and repair]. Novo-cherkassk, 2019. 291 p.
22. Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kniga 1. Opisanie i rabota. Elektricheskiye skhemy [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). Manual. Book 1. Description and work. Electrical diagrams]. Novo-cherkassk, 2006. 251 p.
23. OAO "RZHD" Metodika rascheta potrebnosti v zavodskikh i depovskikh remontakh lokomotivov OAO "RZHD". Raschet R1881 RR: utv. rasporyazheniyem ot 6 fevralya 2019 g. № 198r [JSC "Russian Railways" Methodology for calculating the need for factory and depot repairs of locomotives of JSC "Russian Railways". Calculation of R1881 RR: approved by order of February 6, 2019 No. 198r].

Информация об авторах

Давыдов Юрий Анатольевич – д-р техн. наук, профессор кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: puch@festu.khv.ru.

Мухин Олег Олегович – аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: muhinoo@mail.ru.

Заболотный Владимир Владимирович – аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: zabolotnyy_vv@mail.ru

Information about the authors

Yuri A. Davydov – doctor of engineering science, Professor of the Subdepartment of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: puch@festu.khv.ru.

Oleg O. Mukhin – ph.d. student of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: muhinoo@mail.ru.

Vladimir V. Zabolotnyy – ph.d. student of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: zabolotnyy_vv@mail.ru

Графоаналитическое решение по оптимизации организации выправочно-рихтовочных работ по приведению кривых к проектной документации

В. В. Романенко✉, А. Б. Невзорова, Л. Н. Ародь

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

✉ vromanenko@mail.ru

Резюме

Актуальной задачей на Белорусской железной дороге является повышение скоростей движения. Непременным условием для этого является эксплуатация криволинейных участков, состояние которых обеспечивает не превышение допустимой величины непогашенного ускорения для максимальной установленной скорости пассажирского поезда ($a_{\text{нп}}$) и скорости изменения непогашенного ускорения. С апреля 2020 г. внедрен в эксплуатацию диагностический комплекс объектов инфраструктуры, который позволяет расширить полигон определяемых параметров и оценить объекты инфраструктуры не как отдельные элементы, а комплексно, т. е. оценить геометрию рельсовой колеи в увязке с параметрами земляного полотна и балластной призмы, шириной междупутья, наличием негабаритных мест и т. п. Системный анализ и мониторинг полученных данных комплекса объектов инфраструктуры позволяет отразить состояние технических объектов при помощи автоматизированной системы комплексной диагностики объектов инфраструктуры «Эксперт». На настоящий момент выявлено наличие большого количества криволинейных участков, положение которых не соответствует проектной документации, а также нарушений основных параметров кривых: отклонение возвышения наружного рельса (49,5 %), неровности в плане (35,2 %), несовпадение отводов возвышения и кривизны (17,2 %) и др. Показано, что недостаток организации работ по устранению сдвижек криволинейных участков железнодорожного пути заключается в том, что выправочно-подбивочно-рихтовочные машины работают по способу сглаживания без предварительного анализа сопутствующих факторов. По результатам исследования характеристик существующей кривой на направлении Минск – Молодечно предложено алгоритмическое решение по оптимизации организации выправочно-рихтовочных работ по приведению кривых к проектной документации.

Ключевые слова

железная дорога, криволинейный участок, радиус, длина переходной кривой, величина сдвижки

Для цитирования

Романенко В. В. Графоаналитическое решение по оптимизации организации выправочно-рихтовочных работ по приведению кривых к проектной документации / В. В. Романенко, А. Б. Невзорова, Л. Н. Ародь // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 102–110. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).102-110

Информация о статье

поступила в редакцию: 17.09.2021, поступила после рецензирования: 28.09.2021, принята к публикации: 04.10.2021

Graph-analytical solution for optimizing the organization of straightening works to bring the curves up to the project parameters

V. V. Romanenko✉, A. B. Nevzorova, L. N. Arod

Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

✉ vromanenko@mail.ru

Abstract

Urgent for the Belarusian railways is the task of increasing traffic speeds. A safety precondition here is the operation of curved sections, whose state ensures that the permissible value of the undamped acceleration for the maximum allowed speed of a passenger train (ANP) and the rate of change of the undamped acceleration are not exceeded. In April 2020 diagnostic infrastructure complex of DKI was put into operation, which allows to expand the number of determined parameters, and evaluate the infrastructure, not as separate elements, but comprehensively, that is, to assess the geometry of the track in conjunction with the parameters of the subgrade, ballast section, a width between the tracks, the presence of oversized places, etc. System analysis and monitoring of the data obtained by DKI allows you to reflect the state of technical objects using the automated system for complex diagnostics of infrastructure objects “Expert”. At the moment, a large number of curved sections was revealed whose position does not correspond to the design documentation, as well as violations of the main parameters of the curves, such as: deviation of the external rail elevation (49,5 %), irregularities in the plan (35,2%), mismatch of elevation and curvature bends (17,2 %)

and other deviations. It is shown that the lack of work organization to eliminate the shift-curved sections of railway track consists in the operation of liner-tamping-straightening machines type VPR by the method of smoothing, without prior analysis of related factors. Based on the results of studying the characteristics of the existing curve in the Minsk – Molodechno direction, an algorithmic solution is proposed to optimize the organization of straightening works to bring the curves up to the project documentation requirements.

Keywords

railway, curved section, radius, length of the transition curve, the value of the track shift

For citation

Romanenko V. V., Nevzorova A. B., Arod L. N. Grafoanaliticheskoe reshenie po optimizatsii organizatsii vypravochno-rikhtovochnykh работ po privedeniyu krivykh k poektnoy dokumentatsii [Graph-analytical solution for optimizing the organization of straightening works to bring the curves up to the project parameters]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 101–110.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).101-110

Article Info

Received: 17.09.2021, Revised: 28.09.2021, Accepted: 04.10.2021

Введение

Внедрение и развитие комплексной системы диагностики и мониторинга состояния объектов инфраструктуры является основным фактором, позволяющим принимать решения по содержанию и ремонту объектов железной дороги, обеспечению безопасного и бесперебойного движения поездов.

Система технической диагностики и мониторинга предоставляет соответствующую информацию, необходимую для поддержания в работоспособном состоянии всех устройств, элементов и сооружений объектов инфраструктуры Белорусской железной дороги (БЖД).

С 2017 г. на БЖД функционирует Центр диагностики объектов инфраструктуры государственного объединения «Белорусская железная дорога» (далее – Центр), который является его обособленным структурным подразделением (филиалом).

В состав Центра входят следующие структурные подразделения, не выделенные на отдельный баланс: отдел путевых измерений; дорожная лабора-

тория дефектоскопии; дорожная мостоиспытательная станция; дорожная габаритообследовательская станция; группа по обследованию и диагностике земляного полотна; вагоны-путеизмерители; вагоны-дефектоскопы.

Функциональными обязанностями отдела путевых измерений являются: внесение данных в базу, анализ работы путевых машин, обслуживание автоматизированной системы комплексной диагностики объектов инфраструктуры (АСКД-И) «Эксперт» [1], анализ эффективности проведения восстановительного ремонта, комплексной выправки пути, переустройства.

После внедрения АСКД-И «Эксперт» ежегодно формируется приказ, в котором определяется перечень криволинейных участков, не соответствующих проектному положению по одному из параметров либо по нескольким.

Анализ состояния криволинейных участков

Согласно приказу «Об утверждении Перечня

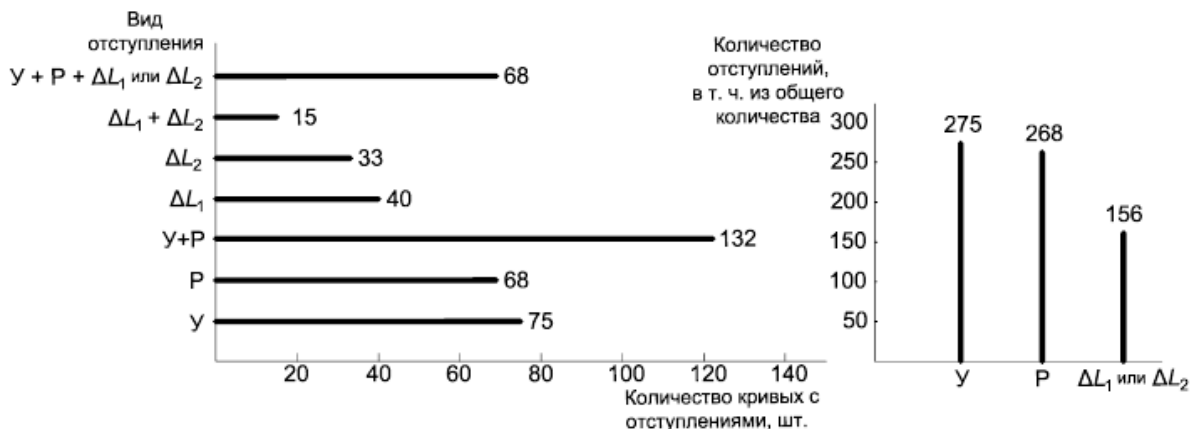


Рис. 1. Распределение выявленных отклонений параметров криволинейных участков от проектной документации

Fig. 1. Distribution of the detected parameter deviations on curved sections from reference values

кривых участков пути, подлежащих проведению в соответствии с проектной документацией на Белорусской железной дороге» от 9 марта 2020 г. № 205-НЗ (далее – Приказ № 205-НЗ) выявлено 437 криволинейных участков, которые имеют отклонения по различным параметрам и их сочетание (рис. 1).

В установленных кривых выявлены следующие отклонения от проектных решений:

- возвышения наружного рельса в пределах круговой кривой более 15 мм ($У$);
- неровности в плане, приводящие к изменению кривизны в пределах круговых кривых (P);
- несовпадение отводов возвышения наружного рельса кривой и кривизны (в пределах 1-ой и 2-ой переходных кривых ΔL_1 и ΔL_2).

Как видно из распределения, отклонение по уровню ($У$) имеют 275 кривых, при этом в 75 случаях отмечено только нарушение возвышения наружного рельса, и у 200 – сочетание нарушения возвышения наружного рельса либо с нарушением кривизны, либо с несовпадением отводов в пределах какой-либо из переходных кривых.

Отклонение по кривизне (P) имеют 268 кривых, при этом 68 – только нарушение кривизны, а еще 200 – сочетание нарушения кривизны либо с нарушением возвышения наружного рельса, либо с несовпадением отводов в пределах из какой-либо переходных кривых.

Нарушения по всем трем показателям ($У$, P , ΔL_1 или ΔL_2) имеют 68 кривых.

Результаты оценки состояния рельсовой колеи в плане, профиле и по уровню могут быть представлены в форме отчетной документации ФП-3.3 – «карточка кривой». В ней дополнительно выявляются уклон отвода возвышения (i), среднее непогашенное ускорение для максимальной установленной скорости пассажирского поезда ($a_{\text{пн}}$) и максимальное значение скорости изменения непогашенного ускорения (Ψ) в кривой.

Превышение $a_{\text{пн}}$ имеют 11 кривых, превышение Ψ – 4 кривых. Кроме того, все кривые имеют сочетание с другими отклонениями (P , $У$, ΔL_1 , ΔL_2).

Максимальное количество кривых отмечено в Минской и Молодечненской дистанциях пути (по 38 кривых), Витебской дистанции пути (35 кривых), Гомельской дистанции пути (33 кривые) и Оршанской дистанции пути (30 кривых).

Максимальное количество кривых с превышением $a_{\text{пн}}$ выявлено в пределах Оршанской и Минской дистанций пути.

Необходимость приведения кривых к проектной документации

Участки железнодорожного пути, обслуживаемые Оршанской и Минской дистанциями пути, входят во II панъевропейский (Критский) транспортный коридор, пролегающий от Берлина (Герма-

ния) через Варшаву (Польша), Минск (Беларусь) в Москву и Нижний Новгород (Россия). На этих направлениях обращаются поезда с самыми высокими скоростями и осевыми нагрузками, ввиду чего содержание путей должно быть обеспечено на высоком уровне.

Пути, обслуживаемые Гомельской и Молодечненской дистанциями пути, входят в IX панъевропейский транспортный коридор, что также накладывает высокие требования к их содержанию.

Одним из основных требований к содержанию объектов инфраструктуры является обеспечение плавности движения поездов с установленными скоростями движения и осевыми нагрузками. Это требование напрямую зависит от величины возвышения наружного рельса $h_{\text{нр}}$ и длин переходных кривых, которые, в свою очередь, устанавливают крутизну отвода положения пути по уровню и в плане [2–4].

При разработке проектной документации величина возвышения наружного рельса $h_{\text{нр}}$ рассчитывается исходя из максимальной скорости движения и массы составов (средневзвешенная квадратичная скорость). Кроме того, одним из условий окончательного назначения величины $h_{\text{нр}}$, является обеспечение комфортабельной езды пассажиров. Соответственно нарушение величины $h_{\text{нр}}$ способствует превышению величины непогашенного ускорения (для БЖД $a_{\text{пн}} \leq 0,7 \text{ м/с}^2$) [5].

На сегодняшний день одной из важнейших задач на БЖД является повышение скоростей движения. Непременным условием для этого является эксплуатация криволинейных участков, состояние которых обеспечивает не превышение допустимой величины непогашенного ускорения для максимальной установленной скорости пассажирского поезда ($a_{\text{пн}}$) и скорости изменения непогашенного ускорения (Ψ) [6].

Согласно проектной документации положение криволинейных участков должно иметь установленные пикетажные положения главных точек – НПК₁, КПК₁, НКН, ККК, КПК₂, НПК₂, исходя из чего, расхождение отводов по уровню и кривизне не допускается. В то же время уменьшение длины отвода приведет к превышению допустимой величины крутизны отвода, что также недопустимо. В этом случае состав, проходя по переходной кривой, не сможет ликвидировать центробежную силу полностью, и, как следствие, возникнет превышение $a_{\text{пн}}$ [7, 8].

Очевидно, что у всех кривых должны быть устранены все выявленные отступления, для чего необходимо провести рихтовочные работы по приведению кривых в проектное положение. Но при выполнении работ по переустройству кривых необходимо соблюдать следующие правила:

- длина переходной кривой должна обеспечивать необходимый уклон отвода возвышения;
- длина переходной кривой должна обеспечивать условие $a_{\text{min}} \leq 0,7 \text{ м/с}^2$;
- длина переходной кривой должна обеспечивать неперевышение $\Psi \leq 0,6 \text{ м/с}^3$;
- при переустройстве кривой недопустимо уменьшение установленных скоростей движения поездов; допускаемого значения ширины междупутья; минимального значения габарита приближения строения [5].

Организация работ по переустройству криволинейных участков

Исправление состояния основных параметров пути возложено на выправочно-подбивочно-рихтовочные (ВПР) машины [9, 10]. Недостаток организации подобных работ заключается в том, что машины работают по способу сглаживания, без заранее проверенных данных, которые до начала выправки желательнее скорректировать, и только после этого принять наиболее объективные решения [11].

Предпочтительным решением в организации работ стало бы проведение предварительной измерительной поездки машиной ВПР, целью которой является измерение параметров состояния пути в плане и по уровню, обработка полученных данных при помощи бортовой системы и корректировка расчетных данных вручную совместно с работниками, непосредственно обслуживающими данный участок, а после получения согласованных результатов проведение выправочно-рихтовочных работ.

Однако, на проведение измерительной поездки требуется выделение «окон», а также измерительная поездка увеличивает занятость машины ВПР. Поэтому в реальных условиях измерительная поездка зачастую не проводится, а работы ведутся по несогласованным данным. Ввиду чего, для приведения кривых из одного положения в другое, необходимо либо несколько выправочных поездок, либо криволинейный участок принимает приближенное пикетажное положение.

Решением подобной проблемы может стать интеграция данных вагонов-путеизмерителей в расчетную систему машин ВПР, как например, в системе «ВПИ-Навигатор» [12]. Однако на БЖД данная система не внедрена. Поэтому авторами проведено графико-аналитическое исследование криволинейных участков пути, указанных в Приказе № 205-НЗ. Целью работы стало определение возможности приведения кривых к проектной документации [13, 14], так как со времени разработки проекта изменились не только их положение, но и условия эксплуатации, и величины сдвижек, которые в дальнейшем можно использовать для работы машины ВПР.

Определение величин сдвижек и возможности приведения кривых в проектное положение

Наряду с определением расчетных параметров кривой необходимо определить и проанализировать величины сдвижек и принять решение с учетом дополнительных факторов:

- многорадиусность кривых;
- наличие и сторонность опор контактной сети;
- величина междупутья;
- ширина балластной призмы (минимальная ширина плеча балластной призмы);
- ширина основной площадки земляного полотна (минимальная ширина обочины);
- наличие негабаритных мест;
- наличие несдвигаемых точек, например, поездов и т. п. [15, 16].

Досконально исследованы пятнадцать кривых, которые обслуживаются Молодечненской, Жлобинской и Могилевской дистанциями пути. Для примера приведен результат исследования кривой в Молодечненской дистанции пути.

Характеристика существующей кривой

Кривая расположена на направлении Минск – Молодечно ПК7682+18 – ПК7684+99, на перегоне Ратомка – Крыжовка, первый главный путь. Участок двухпутный, электрифицированный. Максимальная скорость движения по приказу начальника БЖД на этом участке установлена для пассажирских поездов – 115 км/ч, грузовых – 80 км/ч. Год последнего восстановительного ремонта – 2015 г.

Характеристики существующей кривой по данным вагона-путеизмерителя [17] представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Характеристика существующей кривой на ПК7682+18 – ПК7684+99 по кривизне
Table 1. Characteristics of the existing curve on TC(transition curve) 7682+18 – 7684+99 by its curvature

Кривая по рихтовке								
Наружный рельс	Начало (км м)		Конец (км м)		Радиус, м	Длина кривой, м	Длина переходной кривой, м	
	1	2	1	2			1	2
Левый	769	238	769	549	2970	312	58	175

Таблица 2. Характеристика существующей кривой на ПК7682+18 – ПК7684+99 по уровню
Table 2. Characteristics of the existing curve on TC(transition curve) 7682+18 – 7684+99 by its level

Кривая по рихтовке							
Наружный рельс	Начало (км м)		Конец (км м)		Возвышение наружного рельса, мм	Длина переходной кривой, м	
	1	2	1	2		1	2
Левый	769	207	769	509	32	46	59

Характеристика проектной кривой

Согласно проектной документации кривая должна иметь следующее пикетажное положение: начало кривой (начало первой переходной кривой) ПК7682+18, конец кривой (начало второй переходной кривой) ПК7684+99. Радиус кривой – 3 500 м, длины первой $L_{пк1}$ и второй $L_{пк2}$ переходных кривых должны составлять по 50 м, возвышение наружного рельса $h_{нр}$ – 30 мм, наибольшая крутизна отвода – 0,6 мм/м, угол поворота – $3,70^\circ$ ($3^\circ 42'$), кривая правая.

Анализ параметров существующей кривой (см. табл. 1 и 2), а также пикетажного положения проектной кривой показал следующие несоответствия:

1. Несовпадение соответствующих ординат проектной кривой с существующей кривой по уровню – начало (минус 11 м) и конец (плюс 10 м), а также с существующей кривой по рихтовке – начало (плюс 20 м) и конец (плюс 51 м).

2. Несовпадение начала и конца кривизны обеих переходных кривых с началом и концом отвода возвышения наружного рельса в пределах переходных кривых: для первой переходной кривой величины несовпадений составляют 30 и 43 м, для второй – 75 и 41 м. При этом длина второй переходной кривой составляет 175 м, что значительно превышает длину проектной переходной кривой.

3. Несовпадение длин круговых кривых по рихтовке и по уровню длины проектной круговой кривой на 118 м.

4. Средний радиус существующей кривой составляет 2 970 м, что на 15% меньше радиуса проектной кривой.

5. Фактическая кривизна в круговой части меняется от $1/3586$ до $1/2628$ м.

6. Среднее возвышение 32 мм, фактически изменяется от 28 до 36 мм.

7. Максимальные величины $a_{нр}$, Ψ и i составляют $0,2 \text{ м/с}^2$, $0,17 \text{ м/с}^3$ и $0,7 \text{ мм/м}$.

Анализ соответствия существующей и проектной кривых

Установлено, что существующая кривая не соответствует условиям проектной кривой и отно-

сится к «расстроеным», что при высоких скоростях движения может повлиять на плавность хода подвижного состава и оказать негативное воздействие на путь. При этом по величинам $a_{нр}$, Ψ и i исследуемая кривая удовлетворяет требованиям для скорости 115 км/ч.

Графоаналитический анализ позволил определить сдвиги оси существующего пути при приведении его в проектное положение (рис. 2).

Установлено следующее:

– на участке от НПК₁ до ПК7683+90,00 существующей кривой все сдвиги необходимо проводить вправо к центру кривой, максимальная величина сдвиги составляет 10 см, а с ПК7684+00,00 до НПК₂ сдвиги необходимо проводить влево от центра кривой, максимальная величина сдвиги составляет 12 см;

– максимальное несовпадение существующей и проектной кривых составляет 12 см и находится на ПК7684+50,00.

Участок пути Минск – Молодечно электрифицированный, ось которого на всем протяжении связана с месторасположением опор контактной сети, а также положением контактного провода, которое существенно ограничивает величину смещения оси существующего пути.

Для установления граничных условий необходимо произвести дополнительную проверку габарита опор контактной сети и величины междупутья. При этом нужно учитывать нормы по п. 5.1.10 [18], по которым существующий горизонтальный габарит опор контактной сети может меняться в пределах $2\,750\text{--}3\,100$ мм.

Вывод 1. При приведении габарита от оси пути до опор контактной сети с учетом конструкции и нормативных требований п. 5.1.9 [18] даже без дополнительной проверки габаритных расстояний можно сделать вывод, что величина смещения, равная 10 см в сторону опор контактной сети, влечет за собой большой объем переустройства и может оказаться недопустимой.

В соответствии с таблицей Е.5 [18] требуемое увеличение горизонтальных расстояний между осями путей в кривых составляет 20 мм, что соответ-

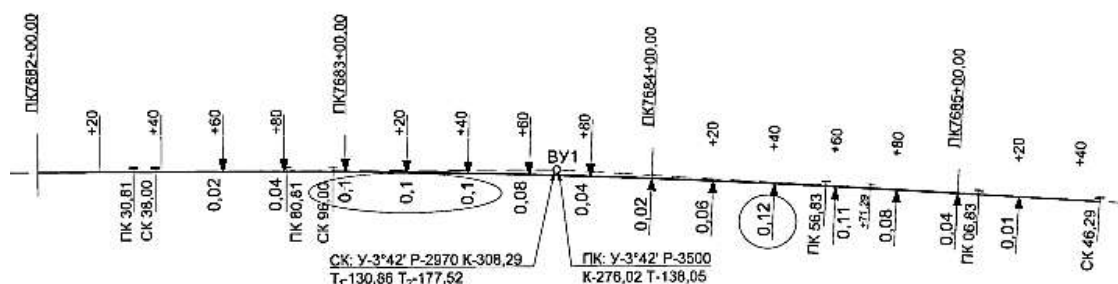


Рис. 2. Определение сдвигов существующей кривой при приведении в проектное положение
Fig.2. Determining shifts of the existing curve while putting it into a reference position

– на участке от НПК₁ до ПК7683+60,00 существующей кривой все сдвиги необходимо проводить вправо к центру кривой, максимальная величина сдвиги составит 6 см, а с ПК7684+00,00 до НПК₂ сдвиги необходимо проводить влево от центра кривой, максимальная величина сдвиги составляет 13 см;

– максимальное несовпадение существующей и проектной кривых составляет 13 см и находится на ПК7684+40,00.

Проверка параметров расчетной кривой № 2

Проверка кривой проводится по тем же параметрам, что и существующей кривой.

Длина расчетной первой переходной кривой № 2 составляет 80 м при возвышении 30 мм, из чего следует, что отвод возвышения наружного рельса [5] составляет $i = 0,375$ мм/м. Расчетный отвод возвышения наружного рельса ниже предельного значения 0,7 мм/м.

При $R_1 = R_{\text{кк}} = 3\,285$ м, $V_{\text{max}} = 115$ км/ч, $h_1 = h_{\text{нр кк}} = 30$ мм величина $a_{\text{нп}} = 0,13$ м/с² [5]. Величина непогашенного ускорения расчетной кривой № 1 меньше, чем допускаемое значение $[a_{\text{нп}}]$, равное 0,7 м/с².

По расчетам $\Psi = 0,05$ м/с³ [5], что меньше допускаемого значения $[\Psi]$, равного 0,6 м/с³.

Вывод 3. Проверка показала, что параметры расчетной кривой № 2 удовлетворяют условиям не превышения допускаемых величин $[a_{\text{нп}}]$ и $[\Psi]$, что позволяет сделать вывод о возможности устройства кривой с такими расчетными параметрами, так как изменение кривой не снижает установленную скорость движения поездов 115 км/ч.

При этом по характеру и направлению сдвижек расчетная кривая № 2 совпадает с проектной кривой, однако максимальная сдвигка в сторону опор контактной сети уменьшилась на 4 см и составила 6 см. Так как указанные выше смещения были рассчитаны с учетом переустройства существующей кривой в расчетную кривую № 2, имеющую идеальное положение, то с учетом допускаемых разностей стрел изгиба (согласно требованиям [5] при скоростях движения поездов 61–120 км/ч – 35 мм) при выправке существующей кривой в плане величину сдвижек возможно еще уменьшить. Таким образом, принимая во внимание величины габаритных расстояний, можно сделать вывод, что смещение в сторону опор контактной сети равно 6 см в пределах круговой кривой и 13 см в пределах первой переходной кривой в сторону второго главного пути вполне допустимо.

Заключение

Произведен анализ проблемы путевого хозяйства БЖД в рамках необходимости приведения су-

ществующих криволинейных участков к проектной документации. Сделаны выводы об организации переустройства кривой, расположенной на направлении Минск – Молодечно, ПК 7682+18 – ПК7684+99, перегоне Ратомка – Крыжовка по первому главному пути.

Результаты анализа состояния криволинейного участка в полной мере подтверждают актуальность проведенного исследования.

Установлено, что данную кривую привести к проектной невозможно, так как это вызовет значительные сдвиги пути в плане, что повлечет за собой большие объемы по переустановке опор контактной сети, так как участок Минск – Молодечно электрифицированный.

Для приведения первой и второй переходных кривых в положение, которое обеспечивает одинаковый отвод по уровню и кривизне, требуется изменение одного либо нескольких параметров.

Графоаналитические исследования показали, что изменение величины радиуса кривой, без изменения других параметров, не только не приведет к желаемому результату, но и увеличит сдвиги, что недопустимо, так как при реализации этих расчетных сдвижек уменьшится ширина междупутья.

Для определения оптимального положения кривой, которое будет удовлетворять и минимальной величине сдвиги, и недопущению перестановки опор контактной сети и уменьшения ширины междупутья необходимо изменить не только радиус круговой кривой, но и длины переходных кривых.

Установлено, что привести кривую к проектной документации в большинстве случаев невозможно, что подтверждают исследования других кривых.

Наиболее возможный вариант, при котором приведение кривой в проектное положение возможно – однопутный неэлектрифицированный участок, на котором не нарушена ширина балластной призмы, и отсутствуют так называемые «несдвигаемые» точки, например, переезды, платформы, негабаритные места и т. п.

На электрифицированных участках без изменения величины радиуса кривой или/и длины одной или обеих переходных кривых переустройство кривых в проектное положение не представляется возможным.

Таким образом, полученные результаты графоаналитических исследований величины сдвижек можно использовать при проведении выправочно-рихтовочных работ машиной типа ВПП в качестве ориентира для получения желаемого итога без проведения дополнительных работ по выправке после прохода машины ВПП.

Список литературы

1. Информационно-аналитическая система комплексной диагностики и мониторинга состояния технических объектов железнодорожной инфраструктуры «ЭКСПЕРТ». URL: <http://www.infotrans-logistic.ru> (дата обращения: 28.10.2020).
2. Корженевич И.П., Курган М.Б. и др. Оценка основных параметров железнодорожных кривых при установлении их максимальных скоростей // Строительство. 2002. № 10. С. 28–34.
3. Курган М.Б., Корженевич И.П., Хмелевська Н.П. Предпосылки о целесообразности переустройства кривых для реализации максимальной скорости движения поездов / Тезисы Междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». Днепропетровск, 2011. Изд-во Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна, 2011. С. 170–171.
4. Новакович В.И. Конструкции верхнего строения пути, обеспечивающие повышенную безопасность движения // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 11. С. 20–22.
5. СТП 09150.56.010-2005 Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ: утв. приказом начальника Бел. ж. д. от 29.06.2006 № 221Н. Минск, 2006. 284 с.
6. Дубровская Т.А. Обоснование проектных решений при реконструкции железных дорог для скоростного движения пассажирских поездов в Республике Беларусь: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06: защищена 27.02.2020; утверждена 26.11.2020 / Дубровская Татьяна Алексеевна; Москва, 2020. 158 с.
7. Довгелюк Н.В., Ахраменко Г.В., Вербило В.А. Реконструкция железных дорог: учеб. пособие. Гомель: БелГУТ, 2017. 339 с.
8. Корженевич И.П., Лыкова С.А., Мамитко А.А. Изменение возвышения наружного рельса вдоль кривой // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна. 2010. № 34. С. 81–87.
9. Андрианов О.А. Машинные методы съёмки и выправки пути // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 9. С. 31–36.
10. Добрынин Л.С., Чернецкая И.С. Постановка пути в проектное положение при производстве ремонтных работ / Л.С. Добрынин. // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. 2020. № 2(8). URL: https://mnv.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/dobrynin_chernetskaya.pdf.
11. Романенко В.В., Качан В.Ф. Организация работ при переустройстве кривых в дистанции пути // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X Международной научно-практической конференции (Гомель, 26–27 ноября, 2020 г.): в 5 ч. Гомель: БелГУТ, 2020. Ч. 4. С. 55–57.
12. Бредюк А.В. «ВПИ-Навигатор»: точность, надежность, экономия // Евразия. Вести. 2014. № 7. URL: <http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2014-07a20>.
13. Бринь М.Я., Канашин Н.В., Полетаев В.И. Расчет элементов и разбивка железнодорожных кривых: учеб. пособие; под ред. М.Я. Бриня. СПб.: Петербургский гос. Ун-т путей сообщения, 2008. 36 с.
14. Турбин И.В. Подбор параметров проектной кривой в декартовой системе координат: учеб. пособие. М., 2003. 32 с.
15. Казначеев Е.А. Плавность хода поездов в кривых малых радиусов // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 7. С. 10–12.
16. Романов А.В., Колос А.Ф., Киселёв А.А., Романов С.В. Причины нарушения плавности хода поездов // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 7. С. 29–31.
17. СТП БЧ 56.242-2012. Оценка состояния рельсовой колеи и меры по обеспечению безопасности движения поездов по показаниям путеизмерительных вагонов: утв. приказом зам. начальника Бел. ж. д. от 20.12.2012 № 1290НЗ. Минск, 2012. 47 с.
18. ГОСТ 9238-2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. Минск: Госстандарт, 2016. 173 с.

References

1. Informacionno-analiticheskaya sistema kompleksnoj diagnostiki i monitoringa sostoyaniya texnicheskix ob`ektov zheleznodorozhnoj infrastruktury «EKSPERT» [Information and analytical system for complex diagnostics and monitoring of technical objects of railway infrastructure «EXPERT»]. URL: <http://www.infotrans-logistic.ru> (accessed 28 October 2020).
2. Korzhenevich I.P., Kurgan D.N., Kurgan N.B., Rengach N.G. Otsenka osnovnykh parametrov zheleznodorozhnykh krivykh pri ustanovlenii ikh maksimal'nykh skorostey [Evaluation of the main parameters of railway curves when establishing their maximum speeds]. *Stroitel'sto* [Construction], 2002, Vol. 1, No 17, pp. 28–34.
3. Kurgan M.B., Korzhenevich I.P., Hmelevska N.P. Predposylki o ceseoobraznosti pereustrojstva krivykh dlja realizacii maksimal'noj skorosti dvizhenija poezdov [Prerequisites for the feasibility of rearranging curves to implement the maximum speed of trains]. *Tezisy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Problemy i perspektivy razvitija zheleznodorozhnogo transporta»* [Theses Of The Intern. scientific-practical Conf. «Problems and prospects of railway transport development»]. Dnepropetrovsk, 2011, pp. 170–171.
4. Novakovich V.I. Konstruktsii verhnego stroeniya puti, obespechivajushhie povyshennuju bezopasnost' dvizhenija [Structures of the upper structure of the track that provide increased traffic safety]. *Put' i putevoe hozyajstvo* [Track and track management], 2019, No 11, pp. 20–22.
5. Tekushchee sodержание zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie trebovaniya i organizatsiya rabot Standard of organization [Current maintenance of the railway track. Technical requirements and organization of work]: STR 09150.56.010-2005: approved by the order of the head of Bel. railway on June 29, 2006. Minsk, 2006. 284 p.
6. Dubrovskaya T.A. Obosnovanie proektnyh reshenij pri rekonstrukcii zheleznyh dorog dlja skorostnogo dvizhenija passazhirskih poezdov v Respublike Belarus': dis. ... kand. tekhn. nauk [Justification of design solutions for the reconstruction of railways for high-speed passenger train traffic in the Republic of Belarus: Ph.D. (Engineering) diss.: 05.22.06]. Moscow, 2020. 158 p.

7. Dovgeljuk N.V., Ahramenko G.V., Verbilo V.A. *Rekonstrukcija zheleznyh dorog* [The reconstruction of Railways]. Gomel: BelSU of Transport Publ., 2017. 339 p.
8. Korzhenevich I.P., Lykova S.A., Mamitko. A.A. *Izmenenie vozvysheniya naruzhnogo rel'sa vdol' krivoj* [Changing the elevation of the outer rail along the curve]. *Vestnik Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akad. V. Lazarjana* [Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after akad. V. Lazaryan], 2010, No. 34, pp. 81–87.
9. Andrianov O.A. *Mashinnye metody s'emki i vypravki puti* [Machine methods of shooting and path alignment]. *Put' i putevoe hozyajstvo* [Path and track management], 2010, No 09, pp.31–36.
10. Dobrynin L.S. *Cherneckaya I.S. Postanovka puti v proektnoe polozhenie pri proizvodstve remontnyh rabot* [Setting the path to the design position during repair work] *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2020, Vol. 8, No 2. URL: https://mnv.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/dobrynin_cherneckaya.pdf.
11. Romanenko V.V., Kachan V.F. *Organization of work in the reconstruction of curves in the distance of the path* [Organizaciya rabot pri perestrojstve krivyh v distantsii puti]. *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferentsii: v 5 chastyakh* (Problems of transport safety: proceedings of the X International Scientific and Practical Conference: in 5 parts). Gomel, 2020, Vol. 4, pp. 55–57.
12. Bredyuk A.V. «VPI-Navigator»: tochnost', nadezhnost', ehkonomiya ["VPI-Navigator": accuracy, reliability, economy]. *Evrasiya. Vesti* [Eurasia. Bulletin], 2014, No 7. URL: <http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2014-07a20>.
13. Brin M.Ya., Kanashin N.V., Poletaev V.I. *Raschet jelementov i razbivka zheleznodorozhnyh krivyh* [The calculation of the elements and laying out railway curves]. Saint Peterburg: Emperor Alexander I ST. Petersburg State Transport University Publ., 2008. 36 p.
14. Turbin I.V. *Podbor parametrov proektnoj krivoj v dekartovoj sisteme koordinat : ucheb* [The selection of the parameters of the design curve in a Cartesian coordinate system]. Moscow: 2003. 32 p.
15. Kaznacheev E.A. *Plavnost' hoda poezdov v krivyh malyh radiusov* [Smooth running of trains in curves of small radii]. *Put' i putevoe hozyajstvo* [Path and track management], 2018, No 7, pp. 10–12.
16. Romanov A.V., Kolos A.F., Kiselyov A.A., Romanov S.V. *Prichiny narusheniya plavnosti hoda poezdov* [The reasons for the violation of the smooth running of trains]. *Put' i putevoe hozyajstvo* [Path and track management], 2020, No 7, pp. 29–31.
17. *Otsenka sostoyaniya rel'sovoj kolei i mery po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov po pokazaniyam putezmeritel'nykh vagonov* [Assessment of the state of the rail track and measures to ensure the safety of train traffic according to the indications of measuring cars]: Standard of organization 56.242-2012: approved by the order of the Deputy. chief of Bel. W. d. on December 20, 2012. Minsk, 2012. 47 p.
18. *Gabarity zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i priblizheniya stroenij* [Dimensions of railway rolling stock and approximation of buildings]: State Standard 9238-2013. Minsk, GosStandar Publ., 2012. 47 p.

Информация об авторах

Романенко Виктория Владимировна – старший преподаватель кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь, e-mail: vromanenkko@mail.ru.

Невзорова Алла Брониславовна – д-р техн. наук, профессор кафедры водоснабжения, химии и экологии, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь, e-mail: anevzorova@bsut.by.

Ародь Людмила Николаевна – Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Минская дистанция пути, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: vromanenkko@mail.ru.

Information about the authors

Viktoriya V. Romanenko – Senior Lecturer of the Subdepartment Design, construction and operation of transport facilities, Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus, e-mail: vromanenkko@mail.ru

Alla B. Nevzorova – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Subdepartment Water Supply, Chemistry and Ecology, Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus, e-mail: anevzorova@bsut.by

Ludmila N. Arod' – Belarusian State University of Transport, Gomel, Minsk distance of the way, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: vromanenkko@mail.ru

Регрессионные модели для автоматизированного расчета показателей травматизма на железнодорожных переездах России и Иркутской области

В. С. Асламова¹✉, Ю. Б. Старовойтова¹, А. А. Асламов², Е. А. Асламова³

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

² Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

³ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

✉ aslamovav@yandex.ru

Резюме

В статье проанализированы причины дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах России и Иркутской области: 86 % дорожно-транспортных происшествий реализуется вследствие проезда водителями красных сигналов светофоров, 12 % – из-за объезда водителями автотранспорта закрытых шлагбаумов. Рассмотрены способы обеспечения безопасности движения на переездах в России и за рубежом. Разработана концептуальная карта железнодорожного переезда с указанием связей функциональных элементов и подсистем его технического оснащения. Выполнена обработка статистических данных о показателях дорожно-транспортных происшествий Госавтоинспекции за 2015–2020 гг. с применением «Statgraphics Plus» и найдены регрессионные модели численности дорожно-транспортных происшествий на переездах России и Иркутской области, численности погибших, раненых и суммарного количества травмированных на переездах. Численность раненых в дорожно-транспортных происшествиях на переездах достаточно точно описываются: для Иркутской области параболической моделью (коэффициент детерминации 99,48 %), для России полиномиальной моделью (коэффициент детерминации 95,56 %). Полученные модели можно использовать для автоматизации расчета показателей травматизма на железнодорожных переездах. Выявлено, что тяжесть последствий дорожно-транспортных происшествий (число смертей, приходящихся на 100 раненых и погибших) в Иркутской области в 2019 и 2020 гг. превышает российский показатель соответственно в 1,86 и 1,2 раза. Выполнен сравнительный анализ показателей травматизма в дорожно-транспортных происшествиях за 2019 и 2020 гг. Обнаружено, что показатели дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах неуклонно снижаются. Существенное уменьшение всех показателей в 2020 г., по-видимому, обусловлено значительным снижением интенсивности автотранспортных потоков в связи с пандемией.

Ключевые слова

железнодорожный переезд, безопасность дорожного движения, концептуальная карта предметной области, дорожно-транспортное происшествие, тяжесть последствий, модель регрессии

Для цитирования

Асламова В. С. Регрессионные модели для автоматизированного расчета показателей травматизма на железнодорожных переездах России и Иркутской области / В. С. Асламова, Ю. Б. Старовойтова, А. А. Асламов, Е. А. Асламова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 111–120. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).111-120

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.09.2021, поступила после рецензирования: 20.09.2021, принята к публикации: 08.10.2021

Regression models for automated calculation of injury indicators on railway crossings in Russia and Irkutsk region

V. S. Aslamova¹✉, Yu. B. Starovoitova¹, A. A. Aslamov², E. A. Aslamova³

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

³ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉ aslamovav@yandex.ru

Abstract

The article analyzes the causes of road traffic accidents at railway crossings in Russia and the Irkutsk region: 86 % of road accidents occur as a result of drivers passing red traffic lights, 12 % – due to drivers driving around closed barriers. Methods of ensuring traffic safety at crossings in Russia and abroad are considered. A conceptual map of a railway crossing with an indication of the connections of functional elements and subsystems of its technical equipment has been developed. The pro-

cessing of statistical data on the indicators of road traffic accidents of the State Traffic Inspectorate for the period 2015–2020 has been carried out using Statgraphics Plus in the environment and regression models were found of the number of road traffic accidents at crossings in Russia and the Irkutsk region, as well as the number of deaths, the wounded and the total number of the injured at crossings. The number of the injured in road accidents at level crossings is described quite accurately: by the parabolic model for the Irkutsk region (determination coefficient 99,48 %) and by the polynomial model for Russia (determination coefficient 95,56 %). The resulting models can be used to automate the calculation of injury rates at level crossings. It was revealed that the severity of the road accidents consequences (the number of deaths per 100 injured and dead) in the Irkutsk region in 2019 and 2020 is 1.86 and 1.2 times higher, respectively, than the Russian indicator. A comparative analysis of injury indicators in road accidents for 2019 and 2020 has been carried out. It was found that the accident rates at the railway crossings are steadily decreasing. A significant decrease in all indicators in 2020, apparently, results from a significant decrease in the intensity of traffic flows due to the pandemic.

Keywords

level crossing, road safety, conceptual domain map, road accident, severity of consequences, regression model

For citation

Aslamova V. S., Starovoitova Yu. B., Aslamov A. A., Aslamova E. A. Regressionnyye modeli dlya avtomatizirovannogo rascheta pokazatelej travmatizma na zheleznodorozhnykh pereezdakh Rossii i Irkutskoj oblasti [Regression models for automated calculation of injury indicators on railway crossings in Russia and Irkutsk region]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 110–120. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).110-120

Article info

Received: 10.09.2021, Revised: 20.09.2021, Accepted: 08.10.2021

Введение

Актуальность проблемы обеспечения безопасности движения (ОБД) на железнодорожных переездах (ЖДП) диктуется важностью железнодорожной транспортной отрасли для жизнеобеспечения российской экономики, функциональностью перевозок, повышенной опасностью ЖДП, приводящей к существенным показателям травматизма, невысокой эффективностью работы автоматической переездной сигнализации, устройств заграждения ЖДП, профилактических мероприятий и статистическими данными о дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) [1].

С позиции ОБД наиболее уязвимыми зонами железнодорожной инфраструктуры являются ЖДП [2, 3]. Острее проблема ОБД на ЖДП чувствуется в странах Европейского союза: именно на ЖДП происходит 25 % всех ДТП [2]. Например, в Бельгии, площадью 30,5 тыс. кв. км, функционирует более 1,5 тыс. переездов, в Иркутской области (ИО) всего 246 ЖДП, при этом площадь ИО в 26,13 раз превышает площадь Бельгии.

В России имеется около 11 тыс. ЖДП, и только на 2 300 ЖДП установлены устройства заграждения [4].

Согласно данным отделения дорожного надзора УГИБДД ГУ МВД РФ в ИО 137 ЖДП относятся к Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД), 22 из них охраняются, 13 имеют федеральное значение. Остальные 109 ЖДП находятся на балансе у других хозяйствующих субъектов [5].

В табл. 1 представлены показатели ДТП на ЖДП [6].

Таблица 1. Показатели дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах

Table 1. Indicators of road traffic accidents at the level crossing

Показатель	Россия			Иркутская область		
	2018	2019	2020	2018	2019	2020
Число ДТП	255	221	216	9	10	5
Погибло, чел.	78	50	48	0	3	1
Ранено, чел.	321	289	245	11	8	4
Тяжесть последствий	19,5	14,7	16,4	0	27,3	20

Видно, что тяжесть последствий – число смертей, приходящихся на 100 травмированных (раненых и погибших) в ДТП, в ИО в 2019 и 2020 гг. превысило российский показатель соответственно в 1,86 и 1,2 раза.

Целью работы являются обнаружение значимых причин ДТП на основе концептуальной карты ЖДП и системного анализа причин ДТП, разработка прогнозных моделей показателей ДТП с использованием регрессионного анализа, обзор новых способов повышения безопасности ЖДП.

Прогнозные модели показателей дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах

Данные статистики [6] за $g = 2015–2020$ гг. обрабатывались в пакете «Statgraphics Plus». Используются следующие критерии достоверности модели: коэффициента детерминации (R^2 , %), показывающий процент данных, аппроксимируемых полученной моделью; скорректированный коэффициент детерминации ($R^2_{\text{с}}$, %), оценивающий тесноту связи между независимой и зависимой переменными

ми; критерий Дарбина – Уотсона (DW), устанавливающий отсутствие автокорреляции в данных; среднеквадратическая σ и абсолютная Δ ошибки. За базовый был принят 2015 г.

На рис. 1 представлена динамика численности ДТП dtj_p на ЖДП РФ, описываемая моделью регрессии (1). Точки на рис. 1 – статистические данные, кривая – регрессия (1). Критерии достоверности регрессии (1) указаны в табл. 2.

$$dtj_p = 273,4 - 17,6(g - 2015)^{0,5} - 0,08(g - 2015)^{3,5} \quad (1)$$

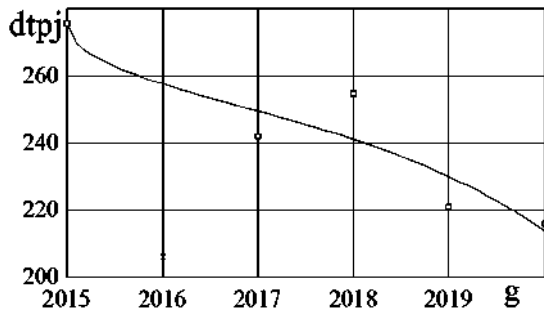


Рис. 1. Динамика численности дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах
Fig. 1. Dynamics of the number of accidents at level crossings

Из рис. 1 видно, что численность ДТП на ЖДП неуклонно снижается. Об адекватности модели можно судить по рис. 2, на котором представлено сопоставление статистических данных dtj_c со значениями dtj_p , рассчитанными по модели (1).

На рис. 3 представлена динамика численности погибших в ДТП dtj_c на ЖДП РФ, описываемая моделью регрессии (2):

$$dtj_c = 92,2 + 2,4(g - 2015) - 2,5(g - 2015)^2 \quad (2)$$

Критерии достоверности регрессии (2) даны в табл. 2.

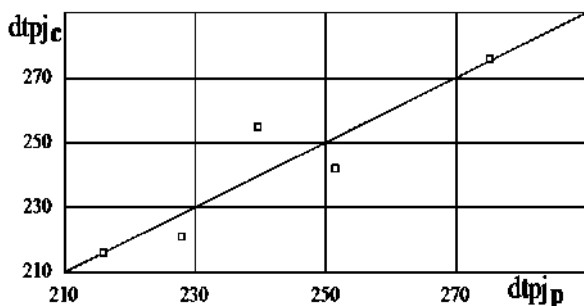


Рис. 2. Сопоставление статистических данных dtj_c со значениями dtj_p , рассчитанными по модели (1)
Fig. 2. Comparison of statistical data dtj_c with dtj_p values calculated by model (1)

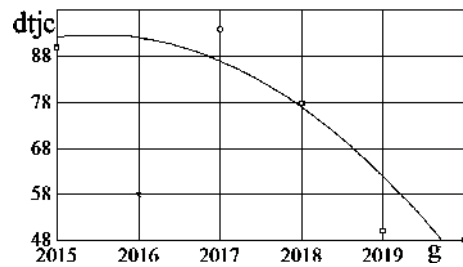


Рис. 3. Динамика численности погибших в дорожно-транспортных происшествиях на железнодорожных переездах
Fig. 3. Dynamics of the number of deaths in road accidents at level crossings

Из рис. 3 видно, что численность погибших на ЖДП снижается, но все же остается значительной. Об адекватности модели можно судить по рис. 4, на котором представлено сопоставление статистических данных dtj_c со значениями dtj_p , рассчитанными по модели (2).

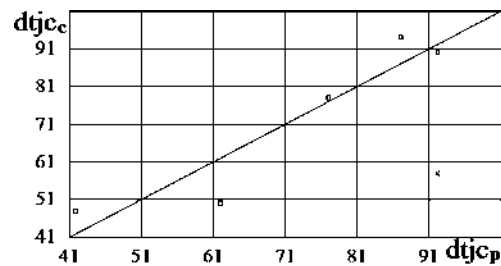


Рис. 4. Сопоставление статистических данных dtj_c со значениями dtj_p , рассчитанными по модели (2)
Fig. 4. Comparison of statistical data dtj_c with dtj_p values calculated by model (2)

На рис. 5 представлена динамика численности раненых в ДТП dtj_p на ЖДП РФ, описываемая моделью регрессии (3):

$$dtj_p = 366,3 - 16,1(g - 2015) - 0,13(g - 2015)^{3,5} \quad (3)$$

Критерии достоверности регрессии даны в табл. 2.

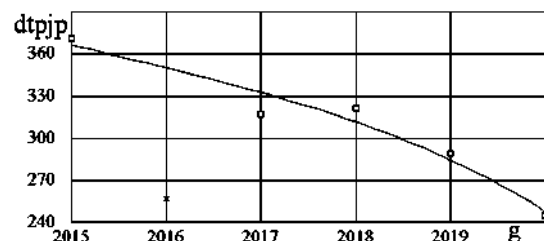


Рис. 5. Динамика раненых в дорожно-транспортных происшествиях на железнодорожных переездах России
Fig. 5. Dynamics of casualties in road accidents at railway crossings in Russia

Об адекватности модели можно судить по рис. 6, на котором представлено сопоставление статистических данных $dtjpc$ со значениями $dtjpp$, рассчитанными по модели (3).

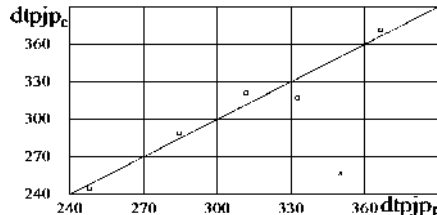


Рис. 6. Сопоставление статистических данных $dtjpc$ со значениями $dtjpp$, рассчитанными по модели (3)

Fig. 6. Comparison of statistical data $dtjpc$ with $dtjpp$ values calculated by model (3)

На рис. 7 представлена динамика численности ДТП dtj на ЖДП ИО, описываемая моделью регрессии (4):

$$dtj = 5,9 + 3,5(g - 2015) - 0,7(g - 2015)^2. \quad (4)$$

Критерии достоверности регрессии (1) указаны в табл. 2.

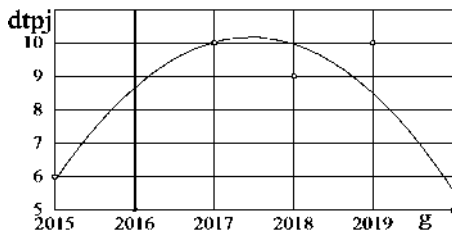


Рис. 7. Динамика численности дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах Иркутской области

Fig. 7. Dynamics of the number of accidents at railway crossings of the Irkutsk region

Об адекватности модели можно судить по рис. 8, на котором представлено сопоставление статистических данных $dtjpc$ со значениями $dtjpp$, рассчитанными по модели (4).

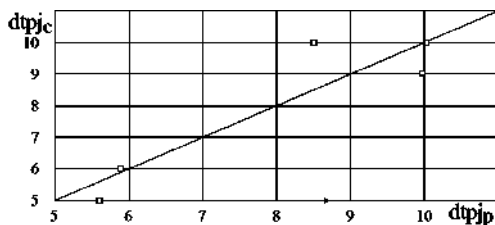


Рис. 8. Сопоставление статистических данных $dtjpc$ со значениями $dtjpp$, рассчитанными по модели (4)

Fig. 8. Comparison of statistical data $dtjpc$ with $dtjpp$ values calculated by model (4)

На рис. 9 представлена динамика раненых в ДТП $dtjpp$ на ЖДП ИО, описываемая моделью ре-

грессии (5):

$$dtjpp = 5,0 + 5,13(g - 2015) - 1,07(g - 2015)^2. \quad (5)$$

Критерии достоверности регрессии даны в табл. 2.

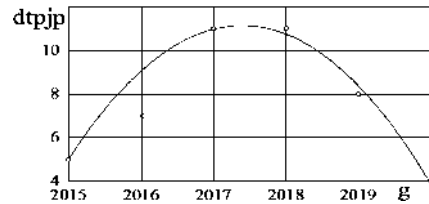


Рис. 9. Динамика раненых в дорожно-транспортных происшествиях на железнодорожных переездах Иркутской области

Fig. 9. Dynamics of the injured in road accidents at railway crossings of the Irkutsk region

Об адекватности модели можно судить по рис. 10, на котором представлено сопоставление статистических данных $dtjpc$ со значениями $dtjpp$, рассчитанными по модели (5).

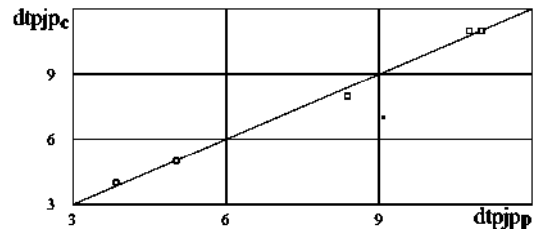


Рис. 10. Сопоставление статистических данных $dtjpc$ со значениями $dtjpp$, рассчитанными по модели (5)

Fig. 10. Comparison of statistical data $dtjpc$ with $dtjpp$ values calculated by model (5)

Из рис. 10 видно, что модель достаточно точно (99,5 %) описывает статистические данные.

На рис. 11 представлена динамика численности травмированных Sj (раненых и погибших в ДТП) на ЖДП ИО, описываемая моделью регрессии (6):

$$Sj = 6,4 + 4,5(g - 2015) - 0,9(g - 2015)^2. \quad (6)$$

Критерии достоверности регрессии (6) указаны в табл. 2.

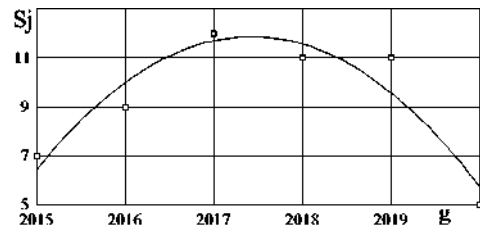


Рис. 11. Динамика раненых и погибших на железнодорожных переездах Иркутской области

Fig. 11. Dynamics of the wounded and dead at railway crossings of the Irkutsk region

Об адекватности модели можно судить по рис. 12, на котором представлено сопоставление статистических данных S_{jc} со значениями S_{jp} , рассчитанными по модели (6).

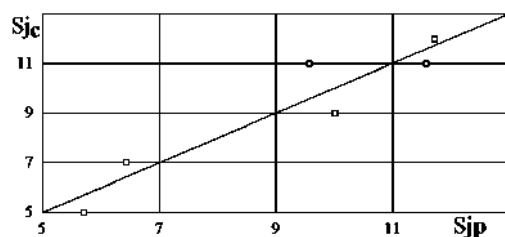


Рис. 12. Сопоставление статистических данных S_{jc} со значениями S_{jp} , рассчитанными по модели (6)

Fig. 12. Comparison of the statistical data S_{jc} with the values of S_{jp} calculated by the model (b)

Таблица 2. Критерии адекватности регрессионных моделей

Table 2. Adequacy criteria for regression models

Номер модели	$R^2, \%$	$R^2_c, \%$	DW	σ	Δ
(1)	86,28	72,57	1,92	12,94	14,14
(2)	87,71	75,43	2,13	10,82	10,39
(3)	95,56	91,11	1,80	13,78	21,68
(4)	83,72	67,44	2,28	1,34	1,15
(5)	99,48	98,95	2,04	0,33	0,48
(6)	88,36	80,61	3,14	1,19	0,76

В табл. 3 приведены результаты сравнительного анализа показателей ДТП на ЖДП. Из табл. 3 видно незначительное снижение численности ДТП (–2,3 %) на ЖДП РФ по сравнению с предыдущим 2019 г. В ИО численность раненых и ДТП снизились на 50 %, что можно объяснить уменьшением интенсивности дорожного движения.

Концептуальная карта железнодорожного переезда

ЖДП представляет собой сложную и чрезвычайно опасную для человека техническую систему [2–4, 7, 8]. К элементам системы относятся автодороги, транспортные средства, участники дорожного движения, вид пользования, категория и участок приближения к ЖДП, технические подсистемы автоматической переездной сигнализации (АПС) и устройства заграждения переезда (УЗП), ДТП, а также окружающая среда [2, 8].

Концептуальная карта (КК) представляет собой

формализованное описание знаний, которое в дальнейшем может быть обработано компьютером. КК, основанные на идее формирования понятийного мышления Д. Асубеля, впервые были использованы в 70-х гг. XX в. ученым-исследователем Дж. Новаком [9]. КК содержит понятия (концепты) предметной области (ПрО) и линии – взаимосвязи между ними. На линиях указаны типы связи между концептами. Перекрестные связи иллюстрируют отношения между концептами, расположенными в различных частях КК.

КК используются широко при разработке баз знаний, в химии, биологии, обучающих системах, научных исследованиях, при поиске информации [9, 10–12]. При использовании КК как средства структурирования знаний реализуются системный подход к изучению ПрО, единообразие представления материала, научность, позволяющая повысить валидность результатов исследования [13]. Для описания ПрО ЖДП в виде КК использован пакет «Смар Tools» [12].

В разработанной КК (рис. 13) используются:

- атрибутивные отношения («характеризует» и «имеет») – означающие иметь значение или свойство;

- каузативное отношение («влияет») – устанавливающее соответствие между причиной и следствием;

- отношение «включает», устанавливающее принадлежность элемента классу [11].

Для повышения наглядности на рис. 13 введено сокращение РКП – резинокордовое покрытие, АТС – автотранспортное средство.

Как видно (см. рис. 13), отказ любого технического устройства ЖДП может привести к реализации ДТП.

Актуальность применения системного подхода к анализу КК способствует рассмотрению организации безопасности дорожного движения (БДД) как системы, которая состоит из совокупности функциональных элементов, обеспечивающих достижение цели при имеющихся ресурсах и связях с внешней средой [2]. Понимание структуры ПрО способствует уяснению места и роли компонентов системы, их важности, взаимосвязи и влиянии друг на друга, вклады одних компонент в функционирование остальных и т. д. [14].

Такой подход позволяет диагностировать причины ДТП, устанавливать их взаимосвязи и взаимовлияние с предлагаемыми решениями по ОБД

Таблица 3. Анализ показателей дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах

Table 3. Comparative analysis of indicators of road traffic accidents

2020 г.	Число дорожно-транспортных происшествий	Аналогичный период прошлого года, %	Погибло	Аналогичный период прошлого года, %	Ранено	Аналогичный период прошлого года, %
Россия	216	–2,26	48	–4	245	–15,22
Иркутская область	5	–50	1	–66,7	4	–50

Таблица 4. Способы повышения безопасности железнодорожных переездов
Table 4. Ways to improve the safety of the railway

Страна	Способы	Недостатки
Великобритания	Строительство путепроводов, шлагбаумов, системы видеонаблюдения, предикторы на базе рельсовых цепей, исключющие подачу сигнала на закрытие шлагбаума во время стоянки поезда	Дорогостоящее строительство мостов и путепроводов в местах пересечений. Затраты на реставрацию дорог, оборудование световыми сигналами, низкий уровень безопасности движения при использовании РКП
Швеция	Ликвидация переездов, строительство автодорог с исключением пересечения с железной дорогой, система FenceGrabber создания «виртуального ограждения» при помощи лазера с выдачей предупредительного сигнала и фотокамерой	
Нидерланды	Оснащение дороги перед железнодорожным переездом световыми сигналами, которые встроены в асфальтовое покрытие, обработка поверхности РКП минеральным порошком для повышения бдительности водителей	
США	Ликвидация переездов, строительство путепроводов и автодорог параллельно железной, система распознавания, фиксации несанкционированных объектов в полосе отвода железной дороги	
Канада	Ликвидация переездов, оборудование покрытия автодорог перед железнодорожным переездом проблесковыми и сигнальными светодиодами, лазерной системой обнаружения поезда	
Испания	Разрабатывается система обнаружения автотранспортного средства и поезда на железнодорожном переезде, выдача предупреждающих сообщений на мобильные телефоны водителям, машинисту	
Германия	Ликвидация переездов, оповещение о железнодорожном переезде участников движения при использовании дорожных знаков, серьезные санкции к нарушителям, оборудование АПС, УЗП, РКП, устройствами извещения о занятости переезда, оснащение системой переездной сигнализации BUSA	
Украина	Установка сигнализации лунно-белым светом, заградительных барьерных установок, дополнительных шлагбаумов, уведомление машиниста поезда о ситуации на железнодорожном переезде	
Белоруссия	Устройство «шумовых» полос, дорожных знаков и разметки, световозвращателей, мигающих светодиодными огнями	

В [27] изучены вопросы повышения безопасности движения за счет использования интеллектуальной системы автоматического управления безопасностью ЖДП.

Способы ОБД на ЖДТ в других странах указаны в табл. 4.

Как следует из табл. 4, профилактическая работа, которая проводится в США, Канаде и Европе, ориентирована на создание и внедрение инновационного технического оснащения ЖДП.

Заключение

Основное внимание в проведении профилактической работы по предупреждению ДТП на ЖДП следует сосредоточить на повышении качества воспитательной работы с водителями.

Особенно трагично, когда в ДТП на железной дороге гибнут дети. Для того чтобы предупредить ДТП с участием детей на ВСЖД в 2019–2020 гг. проводились акции: «Новогодний патруль», «Берегите детей», «Внимание – переезд!», «Дети и транспорт» и месячник «Детям – безопасную железную дорогу»; построен пешеходный переход на станции Посольская через железнодорожные пути; проведена презентация настольной игры для обучения младших школьников правилам поведения на железнодорожных путях в пригородной электричке «Байкальская стрела» [29].

Рассмотренные способы ОБД являются точечными, улучшающими безопасность какого-либо типа ЖДП. Необходимо с использованием новейших достижений техники и информационных технологий, опыта других стран сформировать концепции мониторинга железнодорожного переезда, как способа повышения безопасности ЖДП.

Список литературы

1. Магдич И.А., Петров В.П., Пятибрат А.О. Анализ санитарных и безвозвратных потерь в зависимости от характера и условий чрезвычайных ситуаций на железной дороге // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2019. № 1. С. 72–80.

2. Ефанов Д.В., Осадчий Г.В., Плотников Д.Г., Хорошев В.В. Комплексный учет параметров объектов инфраструктуры железной дороги, железнодорожного подвижного состава и автомобильного транспорта для обеспечения безопасности движения на переездах // Автоматика на транспорте. 2018. Т. 4. № 2. С. 167–194.
3. Ожерельев В.Н., Сащенко Д.А. Модернизация системы безопасности железнодорожного переезда // Бюллетень научных работ Брянского филиала МИИТ. 2016. № 1 (8). С. 26–30.
4. Давыдов А.И., Соколов М.М. Система управления безопасностью на железнодорожных переездах // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 4 (82). С. 38–43.
5. Два опасных железнодорожных переезда в Иркутской области закроют в ближайшие годы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ogirk.ru/2020/9/17/dva-opasnyh-zheleznodorozhnyh-pereezda-v-irkutskoj-oblasti-zakroyut-v-blizhajshie-gody/> (дата обращения 15.03.2020).
6. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения: сайт Госавтоинспекции. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения 21.12.2020).
7. Колмогорова Т.В. Меры по повышению уровня безопасности движения на железнодорожных переездах // Вестник СГУПС. 2012. Вып. 28. С. 41–45.
8. Хашев А.И. Технология расчета потерь на железнодорожных переездах // Вестник РГУПС. 2020. № 1. С. 137–144.
9. Лапшин В.А. Онтология в компьютерных системах. М.: Изд-во: Научный мир, 2010. 224 с.
10. Концептуальная карта и методы её визуализации [Электронный ресурс]. URL: mxsmirnov.com > 2018/06/25 > concept-map (дата обращения 18.03.2020).
11. Асламова Е.А. Онтология предметной области промышленной безопасности и профессиональных рисков // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. в 12 т. / под общ. ред. А. А. Большакова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2020. Т. 12. Часть 1. С. 73–76.
12. Муромцев Д.И. Концептуальное моделирование знаний в системе Concept Map. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2009. 83 с.
13. Абрамова Н.В., Николаева Ю.В. Построение концептуальных карт как метод повышения валидности результатов оценочного исследования // Социология: методология, методы, математическое моделирование (Социология:4М). 2006. Том. 0. № 23. С. 83–99.
14. Аршинский Л.В., Хишигсурен Доржсурен. Разработка онтологии для агрегированного оценивания качества функционирования станции Улан-Баторской железной дороги // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Восьмой Междунар. науч.-практ. конф. 28 марта – 01 апреля 2017 г. Иркутск: в 2 т. Иркутск: ИрГУПС, 2017. Т. 1. С. 396–401.
15. Демьянов В.В., Имарова О.Б., Скоробогатов М.Э. Состояние проблемы и методы обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах // Вестник ИрГТУ. 2018. Т. 22. № 4. С. 215–230. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-215-230>.
16. Лужицкий О.Ф. Пути снижения аварийности на железнодорожных переездах // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2015. № 3. С. 208–222.
17. Лигузова О.Н., Кретов В.А. Основные проблемы пересечений автомобильных и железных дорог и предложения по их решению // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки. Материалы Всерос. конф. с междунар. участием / под общ. ред. Т.В. Шепитко, 2020. С. 79–83.
18. Рожанский Д.В., Карасевич С. Н. Повышение безопасности движения в зоне железнодорожных переездов // Вестник БНТУ. 2007. № 2. С. 60–65.
19. Жаворонков В.А. Особенности дорожно-транспортных происшествий, совершаемых на железнодорожных переездах, и меры по их предупреждению // Транспортное право и безопасность. 2020. № 1(33). С. 87–97.
20. Штрафы на глазок. Госавтоинспекция посчитала нарушителей, выявленных камерами. [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/2019/01/17/v-gibdd-nazvali-chislo-narushenij-dd-vyavlennyh-kamerami.html> (дата обращения 23 марта 2021 г.).
21. Карпущенко Н.И., Величко Д.В., Колмогорова Т.В. Проблема обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах // Транспорт Российской Федерации. 2011. № 4 (35). С. 47–50.
22. Efanov D., Plotnikov D., Osadchy G. Prognosis service for navigation systems regarding time parameters of railroad crossing proceedings of 16th IEEE East-west design & test symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, September 14–17, 2018, pp.201–208. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524770.
23. Ефанов Д.В. Цифровой железнодорожный переезд // Автоматика, связь, информатика. 2018. № 11. С. 11–15.
24. Ефанов Д.В., Мячин В.Н., Осадчий Г.В. Автодорожные путепроводы лифтового типа для пересечения железнодорожных путей в условиях плотной застройки современных городов // Мир транспорта. 2020. Т. 18. № 5. С. 90–108.
25. Кочетов А.С., Липсиц Л.М. Перспективные инновационные безопасные железнодорожные переезды с высокой пропускной способностью // История и перспективы развития транспорта на севере России. 2017. № 1. С. 100–104.
26. Лебедева Н.С., Епифанова Е.П., Петрова А.С. Обеспечение безопасности на железнодорожных переездах // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2020. Т. 1. С. 138–143.
27. Пашков Н.Н. Интеллектуальная система автоматического управления безопасностью железнодорожных переездов // История и перспективы развития транспорта на севере России. 2017. № 1. С. 104–110.
28. Апатцев В.И., Гольщикова Г.В., Юрищева М.С., Астахов В.В. Международный опыт в борьбе с травматизмом граждан на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_34994342_68632333.htm (дата обращения 10 марта 2021 г).
29. Старовойтова Ю.Б., Асламова В.С. Профилактика железнодорожного травматизма детей в Иркутской области // Инновационная наука. 2021. № 1. С. 34–36.

References

1. Magdich I.A., Petrov V.P., Pyatibrat A.O. Analiz sanitarnykh i bezvozvratnykh poter' v zavisimosti ot haraktera i uslovij chrezvychajnykh situacij na zheleznoj doroge [Analysis of sanitary and irrecoverable losses depending on the nature and conditions of emergency situations on the railway]. *Mediko-biologicheskie i social'no-psihologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychajnykh situacijah* [Biomedical and socio-psychological problems of safety in emergencies], 2019, No. 1, pp. 72–80.
2. Efanov D.V., Osadchij G.V., Plotnikov D.G., Horoshev V.V. Kompleksnyj uchet parametrov ob'ektov infrastruktury zheleznoj dorogi, zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i avtomobil'nogo transporta dlya obespecheniya bezopasnosti dvizheniya na pereezdah [Comprehensive accounting of parameters of railway infrastructure facilities, railway rolling stock and road transport to ensure traffic safety at level crossings]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], 2018, Vol. 4, No. 2, pp. 167–194.
3. Ozherel'ev V.N., Sashchenko D.A. Modernizaciya sistemy bezopasnosti zheleznodorozhnogo pereezda [Modernization of the railway crossing security system]. *Byulleten' nauchnykh rabot Bryanskogo filiala MIIT* [Bulletin of scientific works of the Bryansk branch of MIIT], 2016, No. 1(8), pp. 26–30.
4. Davydov A.I., Sokolov M.M. Sistema upravleniya bezopasnost'yu na zheleznodorozhnykh pereezdah 5. Prichiny detskogo travmatizma [Level crossing safety management system]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region], 2020, No. 4(82), pp. 38–43.
5. Dva opasnykh zheleznodorozhnykh pereezda v Irkutskoj oblasti zakroyut v blizhajshie gody [Two dangerous railway crossings in the Irkutsk region will be closed in the coming years]. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.ogirk.ru/2020/9/17/dva-opasnykh-zheleznodorozhnykh-pereezda-v-irkutskoj-oblasti-zakroyut-v-blizhajshie-gody/> (date of treatment 03.15.2020).
6. Svedeniya o pokazatelyah sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya: sajt Gosavtoinspekcii. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (date of treatment 12.21.2020).
7. Kolmogorova T.V. Mery po povysheniyu urovnya bezopasnosti dvizheniya na zheleznodorozhnykh pereezdah [Measures to improve traffic safety at level crossings]. *Vestnik SGUPSa* [Bulletin of SGUPS], 2012, Issue 28, pp. 41–45.
8. Hashev A.I. Tekhnologiya rascheta poter' na zheleznodorozhnykh pereezdah [Technology for calculating losses at level crossings]. *Vestnik RGUPS* [Bulletin RGUPS], 2020, No. 1, pp. 137–144.
9. Lapshin V.A. Ontologiya v komp'yuternykh sistemah [Ontology in computer systems]. M.: Izd-vo: Nauchnyj mir, 2010. 224 p.
10. Konceptual'naya karta i metody eyo vizualizacii. [Elektronnyj resurs]. URL: [mxsmirnov.com > 2018/06/25 > concept-map](https://mxsmirnov.com/2018/06/25/concept-map/) (date of treatment 03.18.2020).
11. Aslamova E.A. Ontologiya predmetnoj oblasti promyshlennoj bezopasnosti i professional'nykh riskov [Ontology of the subject area of industrial safety and professional risks]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah: sb. tr. mezhdunar. nauch. konf.: v 12 t. / pod obshch. red. A. A. Bol'shakova. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta* [Mathematical methods in engineering and technology: collection of articles. tr. international scientific. conf.: in 12 volumes / under total. ed. A. A. Bolshakova. SPb.: Publishing house of Polytechnic. un-ta], 2020, Vol. 12, Part 1, pp. 73–76.
12. Muromcev D.I. Konceptual'noe modelirovaniye znaniy v sisteme Concept Map [Conceptual modeling of knowledge in the Concept Map system]. SPb: SPb GU ITMO, 2009. 83 p.
13. Abramova N.V., Nikolaeva Yu.V. Postroenie konceptual'nykh kart kak metod povysheniya va-lidnosti rezul'tatov ocenoch'nogo issledovaniya [Concept mapping as a method of increasing the validity of the results of the assessment study]. *Sociologiya: metodologiya, metody, matematicheskoe modelirovanie (Sociologiya:4M)* [Sociology: methodology, methods, mathematical modeling (Sociology: 4M)], 2006, Vol. 0, No. 23, pp. 83–99.
14. Arshinskij L.V., Hishigsuren Dorzhsuren. Razrabotka ontologii dlya agregirovannogo ocenivaniya kachestva funkcionirovaniya stancii Ulan-Batorskoj zheleznoj dorogi [Development of an ontology for the aggregated assessment of the quality of functioning of the station of the Ulan Bator railway]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona : materialy Vos'moj Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 28 marta – 01 aprelya 2017 g. Irkutsk : v 2 t.* [Transport infrastructure of the Siberian region: materials of the Eighth Intern. scientific-practical Conf., March 28 - April 01, 2017 Irkutsk: in 2 volumes]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2017, Vol. 1, pp. 396–401.
15. Dem'yanov V.V., Imarova O.B., Skorobogatov M.E. Sostoyanie problemy i metody obespecheniya bezopasnosti dvizheniya na zheleznodorozhnykh pereezdah [State of the problem and methods of ensuring traffic safety at level crossings]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin ISTU]. 2018. Vol. 22. No. 4. Pp. 215–230. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-215-230>.
16. Luzhickij O.F. Puti snizheniya avarijnosti na zheleznodorozhnykh pereezdah [Ways to reduce accidents at level crossings]. *Proektirovanie razvitiya regional'noj seti zheleznykh dorog* [Designing the development of a regional railway network], 2015, No. 3, pp. 208–222.
17. Liguzova O.N., Kretov V.A. Osnovnye problemy peresechenij avtomobil'nykh i zheleznykh dorog i predlozheniya po ih resheniyu [The main problems of intersections of roads and railways and proposals for their solution]. *V sbornike: Sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya otraslevoj nauki. Materialy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Pod obshchej redakciej T.V. SHepit'ko* [In the collection: Current state, problems and prospects for the development of industrial science. Materials of the All-Russian conference with international participation. Edited by T.V. Shepitko], 2020, pp. 79–83.
18. Rozhanskij D.V., Karasevich S.N. Povyshenie bezopasnosti dvizheniya v zone zheleznodorozhnykh pereezdov [Improving traffic safety at level crossings]. *Vestnik BNTU*. [Bulletin BNTU], 2007, No. 2, pp. 60–65.
19. Zhavoronkov V.A. Osobennosti dorozhno-transportnykh proisshestvij, sovershaemykh na zheleznodorozhnykh pereezdah, i mery po ih preduprezhdeniyu [Features of road accidents at level crossings and measures to prevent them]. *Transportnoe pravo i bezopasnost'* [Transport law and safety], 2020, No. 1(33), pp. 87–97.
20. Shtrafy na glazok. Gosavtoinspekcija poschitala narushitelej, vyyavlenykh kamerami. URL: <https://rg.ru/2019/01/17/v-gibdd-nazvali-chislo-narushenij-pdd-vyjavlennykh-kamerami.html> (date of treatment 03.23. 2021).

21. Karpushchenko N.I., Velichko D.V., Kolmogorova T.V. Problema obespecheniya bezopasnosti dvizheniya na zhelezнодороzhnyh perezdah [The problem of ensuring traffic safety at level crossings]. *Transport Rossijskoj Federacii*. [Transport of the Russian Federation], 2011, No. 4(35), pp. 47–50.

22. Efanov D., Plotnikov D., Osadchy G. Prognosis service for navigation systems regarding time parameters of railroad crossing proceedings of 16th IEEE East-west design & test symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, September 14–17, 2018, pp. 201–208. DOI: 10.1109/ EWDTS.2018.8524770.

23. Efanov D.V. Cifrovoy zhelezнодороzhnyj pereezd [Digital level crossing]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], 2018, No. 11, pp. 11–15.

24. Efanov D.V., Myachin V.N., Osadchij G.V. Avtodorozhnye puteprovody liftovogo tipa dlya persecheniya zhelezнодороzhnyh putej v usloviyah plotnoj zastrojki sovremennyh gorodov [Elevator-type road overpasses for crossing railway tracks in conditions of dense development of modern cities]. *Mir transporta* [The world of transport], 2020, Vol. 18, No 5, pp. 90–108.

25. Kochetov A.S., Lipsic L.M. Perspektivnye innovacionnye bezopasnye zhelezнодороzhnye perezdy s vysokoj propusknnoj sposobnost'yu [Future-proof, high capacity, safe level crossings]. *Istoriya i perspektivy razvitiya transporta na severe Rossii* [History and prospects for the development of transport in the north of Russia], 2017, No. 1, pp. 100–104.

26. Lebedeva N.S., Epifanova E.P., Petrova A.S. Obespechenie bezopasnosti na zhelezнодороzhnyh perezdah [Ensuring safety at level crossings]. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century], 2020, Vol. 1, pp. 138–143.

27. Pashkov N.N. Intellektual'naya sistema avtomaticheskogo upravleniya bezopasnost'yu zhelezнодороzhnyh perezdov [Intelligent automatic safety control system for level crossings]. *Istoriya i perspektivy razvitiya transporta na severe Rossii* [History and prospects for the development of transport in the north of Russia], 2017, No. 1, pp. 104–110.

28. Apatcev V.I., Golyшева G.V., Yurishcheva M.S., Astahov V.V. Mezhdunarodnyj opyt v bor'be s travmatizmom grazhdan na ob'ektakh infrastruktury zhelezнодороzhnogo transporta. [Elektronnyj resurs]. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_34994342_68632333.htm (date of treatment 03.10.2021).

29. Starovoytova Yu. B., Aslamova V.S. Profilaktika zhelezнодороzhnogo travmatizma detej v Irkutskoj oblasti [Prevention of railway injuries in children in the Irkutsk region]. *Innovacionnaya nauka* [Innovative science], 2021, No. 1, pp. 34–36.

Информация об авторах

Асламова Вера Сергеевна – д-р техн. наук, профессор, кафедра техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: aslamovav@yandex.ru.

Старовойтова Юлия Борисовна – кафедра техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: yulya.starovoytova.96@mail.ru.

Асламов Александр Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра машин и аппаратов химических производств, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: aaa_mx@angtu.ru.

Асламова Елизавета Александровна – ассистент, кафедра бизнес-информатики и моделирования процессов, Институт управления бизнес-процессами, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: Liza.Ocean@mail.ru.

Information about the authors

Vera S. Aslamova – Dr. Sci., Professor, Subdepartment of Technosphere Safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: aslamovav@yandex.ru.

Yulia B. Starovoytova – Subdepartment of Technosphere Safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: yulya.starovoytova.96@mail.ru.

Alexander A. Aslamov – Cand. tech. Sci., Associate Professor, Subdepartment of Machines and Devices of Chemical Production, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: aaa_mx@angtu.ru.

Elizaveta A. Aslamova – assistant, Subdepartment of Business Informatics and Modeling business processes, Institute of Business Management processes, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: Liza.Ocean@mail.ru.

Совершенствование методов организации перевозок и управления в бизнесе такси

М. Н. Крипак¹✉, О. А. Лебедева², Ю. О. Полтавская²

¹Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Российская Федерация

²Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

✉ marikol@yandex.ru

Резюме

Расширение сферы применения общественного транспорта – одна из актуальных тенденций развития современной транспортной системы, поэтому необходимо обеспечить высокую надежность его функционирования, а также усилить привлекательность по сравнению с индивидуальным транспортом. Важную промежуточную роль между индивидуальным транспортом и транспортом общего пользования играет такси. В статье рассматривается существующая ситуация с рынком такси в России, а также примеры решения некоторых проблемных вопросов, связанных с бизнесом такси за рубежом. Отмечено, что современного и отвечающего всем требованиям закона, регламентирующего перевозку пассажиров и багажа сухопутным транспортом или такси нет, и приведены нормативные документы, которые регулируют лишь самые общие аспекты. Предлагается инструмент для оценки качества обслуживания пассажиров автомобилями такси. Рассматриваются факторы, влияющие на пассажирские перевозки легковыми такси. Для определения закономерности использован показатель количества заказов, принятых перевозчиками за год. Модель структурного уравнения позволяет изучить влияние взаимосвязи между удовлетворенностью пассажиров и показателями качества обслуживания. Предложена методика расчета требуемого количества автомобилей такси с учетом влияния выбранных факторов. Таким образом, данный подход позволяет моделировать исследуемый процесс транспортного обслуживания, учитывая как «скрытые», так и анализируемые переменные. Предложенная методология может быть применена как транспортными предприятиями города, работающими в бизнесе такси, так и проектными организациями для анализа показателей качества обслуживания и проведения мероприятий, направленных на повышение качества предоставляемых услуг.

Ключевые слова

автомобильные перевозки, транспортная система, такси, общественный транспорт, управление

Для цитирования

Крипак М.Н. Совершенствование методов организации перевозок и управления в бизнесе такси / М.Н. Крипак, О. А. Лебедева, Ю. О. Полтавская // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 121–127. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).121-127

Информация о статье

поступила в редакцию: 18.03.2021, поступила после рецензирования: 09.04.2021, принята к публикации: 15.04.2021

Improvement of transportation organization and management methods in taxi business

M. N. Kripak¹✉, O. A. Lebedeva², Yu. O. Poltavskaya²

¹Sevastopol State University, Sevastopol, the Russian Federation

²Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

✉ marikol@yandex.ru

Abstract

Expanding the scope of public transport is one of the current trends in the development of a modern transport system, therefore it is necessary to ensure high reliability of its functioning, as well as to increase its attractiveness as compared to personal transport. Taxis play an important intermediate role between personal and public transport. The article examines the current situation with the taxi market in Russia, as well as examples of solving some problematic issues related to the taxi business abroad. It is noted that there is no modern law to meet all the legal requirements for regulating the passengers and baggage transportation by land transport or taxi with some regulatory instruments given that regulate only the most general aspects. A tool for assessing the quality of passenger service by taxi cars is proposed. The factors influencing passenger transportation by passenger taxis are considered. To determine the pattern, the indicator of the number of orders received by carriers per year was used. The structural equation model allows exploring the impact of the relationship between passenger satisfaction and service quality index. A technique is proposed for calculating the required number of taxi cars, taking into account the influence of the selected factors. Thus, the approach allows modeling the investigated process of transport service, taking into account both "hidden" and analyzed variables.

The proposed methodology can be applied both by city transport enterprises operating in the taxi business and by design organizations to analyze service quality indicators and carry out activities aimed at improving the quality of services provided.

Keywords

road transportation, transportation system, taxi, public transport, management

For citation

Kripak M. N., Lebedeva O. A., Poltavskaya Yu. O. Sovershenstvovaniye organizatsii metodov perevozok i upravleniya v biznese taksi [Improvement of transportation organization and management methods in taxi business]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 120–127.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).120-127

Article Info

Received: 18.03.2021, Revised: 09.04.2021, Accepted: 15.04.2021

Введение

Одной из актуальных тенденций развития современной транспортной системы является расширение сферы применения общественного транспорта. Промежуточное место между общественным и личным транспортом занимает такси. Развитие, регулирование и организация этой сферы транспорта является на сегодняшний день неотъемлемой частью развития крупного города.

Доступность и объективная востребованность услуг частных перевозок (из-за недостаточного количества видов городского пассажирского транспорта общего пользования, и удовлетворения потребностей населения в передвижениях в вечернее и ночное время суток) определяют функционирование обширного сектора национальной экономики – «рынка такси». Численность работающих в такси составила около 600 тыс. чел. по состоянию на 2019 г., а совокупная выручка – около 621 млрд руб. (0,6 % валового внутреннего продукта) [1].

Возникший экономический спад ввиду пандемии коронавируса (COVID-19) и последующий за ним период самоизоляции привели к уменьшению спроса в марте – апреле 2020 г. на 20–50 % и более на услуги такси, что усложнило решение задач, стоящих перед данным сектором. В связи с этим стоит отметить актуальность исследований, направленных на совершенствование методов организации перевозок и управления в бизнесе такси с учетом применения ограничительных мер.

Постановка задачи

В последнее время появилось много служб такси, завуалированных под «транспортные компании», «диспетчерские службы», «службы заказа», даже «транспортные клубы». Эта «нездоровая» конкуренция приводит к уменьшению цены и понижению качества обслуживания.

Рынок транспортных услуг является одним из важных регулируемых экономических сегментов [2–4].

В Турции деятельность агрегаторов такси запрещена, в европейских странах (Германия, Великобритания) – осложнена постоянными проверками

и временными запретами: искусственное ограничение количества выдаваемых лицензий на услуги такси, такая практика используется с 1834 г. [2–5].

В настоящее время во многих странах (США, Франции и др.) сохраняется подобная система квотирования рынка такси. Это приводит к искусственному ограничению числа такси и, как следствие, высокой стоимости получения новой лицензии или приобретения ее на «вторичном рынке». Например, городская комиссия по такси и лимузинам Нью-Йорка (New York City Taxi and Limousine Commission, NYCTLC) имеет право поддерживать количество действующих лицензий на желтые такси (тип hail) на уровне 13 587 ед.

Активное реформирование всей системы таксомоторных перевозок началось в 2011 г. со вступления в силу Федерального закона «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 21 апреля 2011 г. № 69-ФЗ [6, 7], четыре статьи которого были посвящены поправкам, имеющим непосредственное отношение к такси. С этого момента появилась возможность применения мер административного принуждения в виде административной ответственности за нарушение правил перевозок пассажиров и багажа легковым такси; перевозку пассажиров и багажа легковым такси с водителем, не имеющим разрешения на данный вид деятельности. Современного и отвечающего всем требованиям закона, регламентирующего перевозку пассажиров и багажа сухопутным транспортом или такси нет, указанный закон на деле не работает и, по мнению большинства участников перевозочного процесса, является устаревшим и недоработанным.

Государственное регулирование рынка легкового такси в России в настоящее время осуществляется с помощью ряда разрозненных документов (табл.).

Как видно из таблицы «Обзор нормативных актов в области организации перевозок легковым такси», нормативные документы осуществляют регулирование общих аспектов и не содержат новые понятия, такие как «нелегальный перевозчик» и «интер-

Государственное регулирование рынка легкового такси в России
State regulation of the passenger taxi market in Russia

Документ	Объем документа (а.л.)	Направление регулирования / основные положения
Закон от 21.04.2011 №69-ФЗ (ст.9)	0,50	1. Процедурные особенности получения разрешения на осуществление деятельности такси 2. Требования к такси: шахматная расцветка на бортах, специальный цвет по требованию субъекта РФ желтый фонарь на крыше 3. Требования к таксистам: водительский стаж не менее 3 лет 4. Требования к таксопаркам: контроль технического состояния такси перед выходом на линию, обеспечение предрейсового медосмотра водителя, техобслуживание и ремонт такси 5. Субъект РФ вправе ограничить число такси
Устав автотранспорта от 08.11.2007 (ст. 31-33, 36.1)	0,05	1. Перевозка пассажиров и багажа такси осуществляется на основании публичного договора фрахтования, заключенного в устной форме 2. Фрахтовщик обязан выдать фрахтователю квитанцию в форме бланка строгой отчетности или кассовый чек
Правила перевозок автомобильным транспортом от 14.02.2009 (ст. 102-121)	0,15	1. На передней панели легкового такси справа от водителя размещается следующая информация: наименование фрахтовщика, условия оплаты за пользование легковым такси, визитная карточка водителя с фотографией, контакты органа, обеспечивающего контроль осуществления перевозок пассажиров и багажа 2. Маршрут перевозки легковым такси определяется фрахтователем. Если указанный маршрут не определен, водитель легкового такси обязан осуществить перевозку по кратчайшему маршруту

нет-сервис для заказа легкового такси», применяемые на современных интернет-площадках.

Низкий уровень развития рынка легкового такси в России в настоящий момент обусловлен значительным количеством нерешенных проблем, которые приобретали насущность последние 30 лет, – начиная с отсутствия ответственности за жизнь и здоровье пассажиров и заканчивая уклонением от уплаты налогов. Отечественный рынок за последнее десятилетие стал более высокоразвитым, чем на первоначальном этапе становления.

Общая схема организации взаимодействия ключевых субъектов рынка такси представлена на рис.

Без участия государства переход российского рынка такси на новый качественный уровень, сравнимый с развитыми странами, невозможен: рынок транспортных услуг в США, Европе, Австралии прошел длительную эволюцию и систематически регулируется государством. В России данным вопросам необходимо уделять больше внимания как на законодательном, так и на исполнительном уровнях, ввиду отсутствия стратегического подхода к развитию рынка легкового такси, а также концепции и раздела в транспортной стратегии регионов.

В последнее время среди руководителей служб такси устоялось мнение, что содержать свой

таксопарк невыгодно. Лучше заключать договоры с водителями на личных автомобилях, так как нет затрат на техническое обслуживание, да и вообще проблем меньше.

На самом деле, это далеко не так. Отказавшись от своего автопарка, службы такси, прежде всего, теряют в качестве обслуживания пассажиров, не могут точно спрогнозировать количество автомобилей на смене и, соответственно, теряют прибыль. Почему же так происходит? Дело в том, что в большинстве городов России уже давно принято заключать договоры с водителями, которые приходят работать на автомобили предприятия, на следующих условиях. Водитель регистрируется как индивидуальный предприниматель и заключает договор аренды таксомотора на одни сутки. Выходит, на смену, работает, а на следующее утро оплачивает аренду в размере 40 % от общей суммы, полученной от клиентов. Расходы на топливо несет водитель, остальная сумма считается его заработком.

Сегодня остро встал вопрос устранения пробелов в правовом регулировании деятельности агрегаторов такси и водителей, их использующих, в целях обеспечения безопасности движения, сохранения социальной стабильности в сфере наемного труда и здоровой конкуренции на рынке соответствующих услуг.



Примечания: * – гражданин заключает договор аренды личного автомобиля с таксопарком, после чего договор немедленно расторгается;

** – при отсутствии личного автомобиля он берется в аренду у таксопарка (за 1–1,5 тыс. руб. в сутки), в договоре обычно указывается, что ответственность за перевозку, прохождение предрейсовых осмотров и т.д. ложится на арендатора;

*** – прямой агентский договор;

**** – возможность регистрации в качестве самозанятого на 1 февраля 2020 года предоставлялась не во всех регионах РФ.

Общая схема взаимодействия основных субъектов рынка легкового такси
General interaction scheme for the main subjects of the light taxi market

Поэтому требуется либо разработка отдельного нормативного правового акта, регулирующего деятельность так называемых агрегаторов такси, либо внесение дополнений в существующие нормативные правовые акты, которые бы предусматривали:

1. Четкие требования к регистрации интернет-платформой водителей-пользователей услугами «агрегатора», включая проверку его статуса (работник автотранспортного предприятия или ИП, занимающийся легальным предоставлением услуг такси), проверку необходимых для автомобиля – такси – технических и правовых характеристик (включая полис ОСАГО);

2. Установку тахографов на автомобили, предоставляющие услуги такси;

3. Временное ограничение интернет-платформой предоставляемых водителю заказов в течение суток и недели с учетом установленных законодательством максимальных нормативов рабочего времени;

4. Субсидиарную имущественную ответственность «агрегатора» в случае причинения вреда жизни и здоровью пассажира такси, пешехода или других участников дорожного движения (при выполнении заказа), особенно в случае регистрации на платформе водителя и (или) автомобиля, не отвечающих требованиям, предъявляемым в сфере оказания услуг такси.

Разработка модели для определения необходимого количества автомобилей такси

Влияние на пассажирские перевозки легковыми такси могут оказывать несколько факторов:

- численность городского населения;

- экономический уровень жизни населения, величина транспортных тарифов, принципы размещения торговой сети;

- географическое положение, расселение населения по отношению к местам работы;

- развитие маршрутной сети, плотность транспортной сети, регулярность движения городского общественного транспорта, комфортабельность поездки;

- климатический фактор (температура воздуха, количество осадков и т. д.) и другие факторы [8, 9].

Помимо перечисленных факторов дополнительно с учетом специфики региона исследования (г. Севастополь) являются:

- сезон года;

- численность туристов и других категорий приезжих;

- количество культурно-развлекательных учреждений и график их работы.

Математическая модель для определения количества заказов, выполненных перевозчиками за год (Y) с учетом влияющих факторов, представлена в виде:

$$Y = (x_1 \cdot k_i, x_2),$$

где x_1 – совокупность постоянных жителей города, тыс. чел.; k_i – коэффициент миграционной активности населения в i -й период; x_2 – плотность маршрутной сети города, км/км².

Значение показателя x_2 определяется как отношение протяженности маршрутной сети города к площади жилой застройки:

$$x_2 = L / A,$$

где L – протяженность маршрутной сети, км; A – площадь жилой застройки, км².

Количество автомобилей такси существенно влияет на уровень транспортного обслуживания населения и на эффективность перевозок [10, 11].

Пассажиروоборот на одном транспортном средстве W может быть рассчитан как произведение объема перевезенных пассажиров и средней длины поездки [12, 13]:

$$W = Q_m \cdot l_{cp}, \text{ пасс-км}, \quad (1)$$

где Q_m – объем перевозок, пасс.; l_{cp} – средняя длина поездки, км.

На объем перевозок влияют все перечисленные факторы [15–18], при этом следует учесть и вероятностные характеристики, играющие часто значительную роль [19–21]. С учетом сказанного объем перевозок автомобилями такси может быть представлен как

$$Q_m = N_{жс} \cdot P_n \cdot \Sigma k_i, \text{ пасс.}$$

где $N_{жс}$ – численность населения, чел.; P_n – подвижность населения с использованием автомобилей такси, поездки/пасс.; Σk_i – суммарное значение коэффициентов, учитывающих факторы влияния на подвижность.

Пассажируоборот можно определить следующим образом:

$$W = A_m q_{cp} L_{cp.сут} \beta_n, \text{ пасс-км.},$$

где A_m – количество автомобилей такси, ед.; q_{cp} – среднее наполнение автомобиля такси, чел.; $L_{cp.сут}$ – среднесуточный пробег одного автомобиля такси, км.; β_n – коэффициент платного пробега.

Преобразовав выражение (1), получим формулу:

$$A_T = \frac{N_{жс} \cdot P_n \cdot \sum k_i \cdot l_{cp}}{q_{cp} \cdot L_{cp.сут} \cdot \beta_n}, \text{ ед.}$$

Предлагаемая методика проверяется в рамках научно-исследовательской работы в Севастопольском государственном университете. Планируется разработка математической модели определения потребности в автомобилях такси и проведение анализа влияния каждого рассмотренного фактора на эту модель.

Заключение

Целью данного исследования было решение ряда актуальных задач, касающихся эффективности функционирования нового сервиса «агрегаторов» такси.

Необходимо адаптировать правовое регулирование деятельности в области обеспечения безопасности дорожного движения сервисов такси на базе интернет-площадок, а, в частности, развитие специального налогового режима для самозанятых граждан.

Определить минимальное количество автомобилей таксопарка (собственность, аренда, лизинг), а затем составить стратегический прогноз поэтапного увеличения парка подвижного состава. Данные меры позволят вывести транспортный сектор на новый уровень, позволяя исключить монополизацию.

Список литературы

1. Эзрох Ю.С. Российский рынок легкового такси: проблемы и государственное регулирование // Экономическая политика. 2020. Т. 15. № 4. С. 138–163.
2. Thelen K. Regulating Uber: The Politics of the Platform Economy in Europe and the United States // Perspectives on Politics. 2018. Vol. 16. No 4. P. 938–953.
3. Petrović S., Jakšić T. Regulation and Competition of Taxi Services // Uber—Brave New Service or Unfair Competition, Ius Gentium: Comparative Perspectives on Law and Justice / M. Jasenko, S. Petrović, M. Mudrić, H. Lisičar (eds.). Zurich: Springer, Cham, 2019. P. 153–180.
4. Frazzani S., Grea G., Zamboni A. Study on Passenger Transport by Taxi, Hire Car with Driver and Ridesharing in the EU. 2016. URL: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2016-09-26-pax-transport-taxi-hirecar-w-driver-ridesharing-final-report.pdf>.
5. Monteiro J., Prentice B. The Tale of Taxi Reforms in Two Cities: The Failure of Closed Entry. Conference Paper. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/312192094>.
6. Тихомирова Ю.В. Защита прав граждан при перевозке пассажиров и багажа легковым такси // Законность. 2016. № 9 (983). С. 21–23.
7. Михайлов, А. Ю. Уровень обслуживания как показатель надёжности улично-дорожной сети / А. Ю. Михайлов, Р. Н. Горбунов, З. В. Горбунова // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 4(77). – С. 194-203.
8. Якунина Н.В. Оценка функционала управления региональными перевозками пассажирами легковыми такси / Н.В. Якунина, В.В. Котов // Автотранспортное предприятие. 2011. № 1. С. 8–12.
9. Якунин Н.Н., Котов В.В. Совершенствование организации перевозок пассажиров легковыми такси // Вестник оренбургского государственного университета. 2011. № 10(129). С. 6–12.
10. Герами В.Д. Совершенствование организации работы легковых автомобилей-такси: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / В.Д. Герами. Москва. 1984. 22 с.
11. Гозбенко В.Е. Методы прогнозирования и оптимизации транспортной сети с учетом мощности пассажиро- и грузопотоков / В.Е. Гозбенко. ИргУПС, Иркутск, 2008. с. 76. Деп. в ВИНТИ. 15.04.2008, №330-В2008.
12. Lebedeva O.A. Modeling of public transport waiting time indicator for the transport network of a large city / O.A. Lebedeva, M.N. Kripak // MATEC Web of Conferences : 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Tech-

nologies and Equipment, ICMTMTE 2018, Sevastopol, 10–14 сентября 2018 г. Sevastopol: EDP Sciences, 2018. P. 04018. DOI 10.1051/mateconf/201822404018.

13. Михайлов А.Ю., К вопросу развития современной системы критериев оценки качества функционирования общественного пассажирского транспорта / А.Ю.Михайлов, М.И. Шаров // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т. 9. № 19 (146). С. 64–66.

14. Лебедева О.А. Пассажиропотоки и методы их изучения / О.А. Лебедева, М.Н. Крипак // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2011. Т. 1. С. 29.

15. Lebedeva O.A. Model of Passenger Counting System Data Treatment / O.A. Lebedeva, A. Mikhailov // Transportation Research Procedia: 12th International Conference "Organization and Traffic Safety Management in Large Cities", SPbOTSIC 2016, Saint-Petersburg, 28–30 сентября 2016 г. Saint-Petersburg: Elsevier B.V., 2017. P. 401–405. DOI 10.1016/j.trpro.2017.01.065.

16. Оленевич В.А. Задачи приспособления транспортной инфраструктуры к новым технологиям / В.А. Оленевич, В.Е. Гозбенко // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2021. № 8. С. 189–190.

17. Полтавская Ю.О. Оценка скорости и продолжительности движения общественного транспорта на маршруте / Ю.О. Полтавская, В.Е. Гозбенко // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2019. № 3(43). С. 48–54. DOI 10.20291/2079-0392-2019-3-48-54.

18. Гудков В.А. Определение показателей качества пассажирских перевозок в условиях неопределенности / В.А. Гудков, И.В. Гермашев, М.М. Бочкарева, В.Е. Дербише // Прогрессивные технологии в транспортных системах: Сборник докладов VIII Российской научно-практической конференции (29–30 ноября). Оренбург: ГОУ ОГУ, 2007. С. 107–115.

19. Кузьмин О.В., Старков Б.А. Бинарные матрицы с арифметикой треугольника паскаля и символные последовательности. Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика. 2016. Т. 18. С. 38–47.

20. Кузьмин О.В. Построение обобщенных a - и v -полиномов в пространстве отображений // Методы дискретного анализа в теории графов и сложности. Новосибирск, 1992. С. 66–76.

21. Кузьмин О.В., Леонова О.В. Полиномы Тушара и их приложения // Дискретная математика. 2000. Т. 12. № 3. С. 60–71.

References

1. Ezrokh Yu.S. Rossiyskiy rynek legkovogo taksi: problemy i gosudarstvennoye regulirovaniye [The Russian passenger taxi market: problems and state regulation]. *Ekonomicheskaya politika* [Economic policy], 2020, Vol. 15, No. 4, pp. 138–163.

2. Thelen K. Regulating Uber: The Politics of the Platform Economy in Europe and the United States. *Perspectives on Politics*, 2018, Vol. 16, No 4, pp. 938–953.

3. Petrović S., Jakšić T. Regulation and Competition of Taxi Services. Uber—Brave New Service or Unfair Competition, *Ius Gentium: Comparative Perspectives on Law and Justice* / M. Jasenko, S. Petrović, M. Mudrić, H. Lisičar (eds.). Zurich: Springer, Cham, 2019, pp. 153–180.

4. Frazzani S., Grea G., Zamboni A. Study on Passenger Transport by Taxi, Hire Car with Driver and Ridesharing in the EU. 2016. URL: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2016-09-26-pax-transport-taxi-hirecar-w-driver-ridesharing-final-report.pdf>.

5. Monteiro J., Prentice B. The Tale of Taxi Reforms in Two Cities: The Failure of Closed Entry. *Conference Paper*, 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/312192094>.

6. Tikhomirova Yu.V. Zashchita prav grazhdan pri perezovke passazhirov i bagazha legkovym taksi [Protection of the rights of citizens when transporting passengers and luggage by passenger taxi]. *Zakonnost'* [Legality], 2016, No. 9(983), pp. 21–23.

7. Mikhailov A.Yu., Gorbunov R.N., Gorbunova Z.V. Uroven' obsluzhivaniya kak pokazatel' nadozhnosti ulichno-dorozhnoy seti [The level of service as an indicator of the reliability of the road network]. *Mir transporta* [The world of transport], 2018, Vol. 16, No. 4(77), pp. 194–203.

8. Yakunina N.V., Kotov V.V. Otsenka funktsionala upravleniya regional'nymi perezovkami passazhirov legkovymi taksi [Evaluation of the functional management of regional passenger transportation by passenger taxis]. *Avtotransportnoye predpriyatiye* [Motor transport enterprise], 2011, No. 1, pp. 8–12.

9. Yakunin N.N., Kotov V.V. Sovershenstvovaniye organizatsii perezovok passazhirov legkovymi taksi [Improving the organization of passenger transportation by passenger taxis]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State University], 2011, No. 10(129), pp. 6–12.

10. Gerami V.D. Sovershenstvovaniye organizatsii raboty legkovykh avtomobiley-taksi: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.10 [Improving the organization of work of passenger cars-taxis: author. Ph.D. (Engineering) diss.: 05.22.10]. Moscow, 1984. 22 p.

11. Gozbenko V.E. Metody prognozirovaniya i optimizatsii transportnoy seti s uchetom moshchnosti passazhiro- i grup-zopotokov [Methods of forecasting and optimization of the transport network taking into account the capacity of passenger and cargo flows]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2008. 76 p. Dep. in VINITI. April 15, 2008, No. 330-B2008.

12. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Modeling of public transport waiting time indicator for the transport network of a large city. *MATEC Web of Conferences : 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018 – Sevastopol*: EDP Sciences, 2018, P. 04018. DOI 10.1051/mateconf/201822404018.

13. Mikhailov A.Yu., Sharov M.I. K voprosu razvitiya sovremennoy sistemy kriteriyev otsenki kachestva funktsionirovaniya obshchestvennogo passazhirskogo transporta [On the issue of the development of a modern system of criteria for assessing the quality of functioning of public passenger transport]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Izvestiya Volgograd State Technical University], 2014, Vol. 9, No. 19(146), pp. 64–66.

14. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Passazhiropotoki i metody ikh izucheniya [Passenger and methods of their study]. *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskiiy progress [Modern technologies and scientific and technical progress]*, 2011, Vol. 1, pp. 29.
15. Lebedeva O.A., Mikhailov A. Model of Passenger Counting System Data Treatment. *Transportation Research Procedia: 12th International Conference "Organization and Traffic Safety Management in Large Cities", SPbOTSIC 2016, Saint-Petersburg, September 28-30, 2016*. Saint-Petersburg: Elsevier B.V., 2017, pp. 401–405. DOI 10.1016/j.trpro.2017.01.065.
16. Olentsevich V.A., Gozbenko V.Ye. Zadachi prispособleniya transportnoy infrastruktury k novym tekhnologiyam [Tasks fit the transport infrastructure to new technologies]. *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskiiy progress [Modern technologies and scientific and technical progress]*, 2021, No. 8, pp. 189–190.
17. Poltava J.O., Gozbenko V.Ye. Otsenka skorosti i prodolzhitel'nosti dvizheniya obshchestvennogo transporta na marshrute [Evaluation of the speed and duration of movement of public transport on the route]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of the Ural State University of Railways]*, 2019, No. 3(43), pp. 48–54. DOI 10.20291/2079-0392-2019-3-48-54.
18. Gudkov V.A., Germashev I.V., Bochkareva M.M., Derbie V.E. Opredeleniye pokazateley kachestva passazhirskikh perevozok v usloviyakh neopredelennosti [Determination of indicators of the quality of passenger transportation in the conditions of uncertainty]. *Progressivnyye tekhnologii v transportnykh sistemakh: Sbornik do-kladov VIII Rossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (29–30 noyabrya) [Advanced technologies in transport systems: a Collection of papers of the VIII Russian scientific and practical conference (November 29–30)]*. Orenburg: GO OSU, 2007, pp. 107–115.
19. Kuzmin O.V., Starkov B.A. Binarnyye matritsy s arifmetikoy treugol'nika paskalya i simbol'nyye posledovatel'nosti [Binary matrices with Pascal's triangle arithmetic and symbolic sequences]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika [Bulletin of Irkutsk State University. Series: Mathematics]*, 2016, Vol. 18, pp. 38–47.
20. Kuzmin O.V. Postroyeniye obobshchennykh a- i v-polinomov v prostranstve otobrazheniy [Construction of generalized a- and b-polynomials in the mapping space]. *Metody diskretnogo analiza v teorii grafov i slozhnosti [Methods of discrete analysis in graph theory and complexity]*. Novosibirsk, 1992, pp. 66–76.
21. Kuzmin O.V., Leonova O.V. Polinomy Tushara i ikh prilozheniya [Tushar polynomials and their applications]. *Diskretnaya matematika [Discrete mathematics]*, 2000, Vol. 12, No. 3, pp. 60–71.

Информация об авторах

Крипак Марина Николаевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, e-mail: marikol@yandex.ru.

Лебедева Ольга Анатольевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: kravhome@mail.ru.

Полтавская Юлия Олеговна – канд. техн. наук, доцент кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: juliapoltavskaya@mail.ru.

Information about the authors

Marina N. Kripak – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Associate Professor, the Subdepartment of Automobile transport, Sevastopol State University, Sevastopol, e-mail: marikol@yandex.ru

Ol'ga A. Lebedeva – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Subdepartment of Management of Automobile Transport, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: kravhome@mail.ru.

Yuliya O. Poltavskaya – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Management of Automobile Transport, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: juliapoltavskaya@mail.ru

Исследование работы регуляторов мощности испытательной станции тяговых электродвигателей подвижного состава

А. Л. Мартусов✉

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

✉ aleksey.martusov@yandex.ru

Резюме

В статье рассматривается вопрос энергетической эффективности регуляторов мощности, которые применяются на испытательных станциях тяговых электродвигателей подвижного состава. В работе проведен анализ современного оборудования, применяемого на испытательных станциях, на основании математического моделирования. Математическое моделирование позволяет убедиться, что в тиристорных преобразователях существуют коммутационные провалы в кривых синусоид питающего напряжения и присутствует несинусоидальность кривой тока. Также коммутационные провалы присутствуют и в кривых питающего напряжения. Наличие данных помех вызвано существующим интервалом коммутации, вследствие чего возникает междуфазовое короткое замыкание коммутируемых фаз. Кроме того, существующие регуляторы мощности снижают действующее напряжение. Проведенный анализ работы предлагаемых регуляторов мощности в составе испытательной станции позволил исследовать все гармонические составляющие напряжения и тока питающей сети. На основании уточненного закона сохранения энергии предложено устройство, которым за счет изменения входного электрического сопротивления выполняется регулирование мощности испытательной станции. Представленный математический анализ регуляторов мощности испытательной станции на питающую сеть позволяет сделать вывод, что при использовании выпрямителей на диодах применяется весь потенциал источника питания. Влияние на питающую сеть минимизировано с использованием предлагаемых регуляторов мощности на базе электрического полупроводникового вариатора. Эти регуляторы позволяют не загружать питающую сеть дополнительными токами, исключают негативное воздействие, которое на данный момент блокируется только вводом дополнительных фильтрующих элементов. Данные устройства обеспечивают коэффициент мощности близкий к единице и поддерживают высокую электромагнитную совместимость испытательной станции с питающей электрической сетью на всем диапазоне регулирования мощности.

Ключевые слова

подвижной состав, испытательная станция, выпрямитель, тяговый двигатель, электромагнитная совместимость, коэффициент заполнения, математическая модель

Для цитирования

Мартусов А. Л. Исследование работы регуляторов мощности испытательной станции тяговых электродвигателей подвижного состава / А. Л. Мартусов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 128–134. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).128-134

Информация о статье

поступила в редакцию: 12.08.2021, поступила после рецензирования: 10.09.2021, принята к публикации: 23.09.2021

Power regulators operation research for test station of rolling stock traction electric motors

A. L. Martusov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ aleksey.martusov@yandex.ru

Abstract

In the article the issue of energy efficiency of power regulators used at test stations of traction electric motors of rolling stock is considered. The paper analyzes modern equipment used at test stations based on mathematical modeling. Mathematical modeling allows to make sure that switching dips in the sinusoidal curves of the supply voltage exist in thyristor converters, as well as a non-sinusoidal current curve. Switching dips are also present in the supply voltage curves. The presence of these disturbances is caused by the existing switching interval, as a result of the phase-to-phase short circuit of the switched phases. Besides, the existing power regulators reduce the effective voltage. The analysis performed of the operation of the proposed power regulators in the test station, based on which all harmonic components of the voltage and current of the supply network are analyzed. Based on the refined law of conservation of energy, a device is proposed, which, by changing the input electrical resistance, regulates the power of the test station. The performed mathematical analysis of the power controllers of the test station for the supply network leads the conclusion that when using rectifiers on diodes, the entire potential of the power source is used. The impact on the supply network is minimized by using the proposed power regulators based on an electric semiconductor variator. The proposed

regulators allow not loading the supply network with additional currents, ruling out the negative impact, which currently is avoided only by the introduction of additional filter elements. These devices provide a power factor close to unity and maintain high electromagnetic compatibility of the test station with the mains supply throughout the entire power control range.

Keywords

rolling stock, test station, rectifier, traction motor, electromagnetic compatibility, filling factor, mathematical model

For citation

Martusov A. L. Issledovanie raboty regulyatorov moshnosti ispitatel'noy stancii tyagovih elektrodvigateli podvijnogo sostava [Power regulators operation research for test station of rolling stock traction electric motors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 128–134.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).128-134

Article info

Received: 18.03.2021, Revised: 09.04.2021, Accepted: 15.04.2021

Введение

Железнодорожный транспорт является основой транспортного комплекса России. Возможное развитие железных дорог России напрямую связано с исследованиями в области фундаментальной и прикладной науки, конструкторскими и технологическими разработками и создания совершенно нового тягового подвижного состава. Перед ОАО «РЖД» поставлены задачи повышения эффективности ремонта подвижного состава. В связи с этим сформирована стратегия развития «РЖД» на период до 2030 г. [1]. Решение данных проблем можно осуществить только путем модернизации или внедрения новых научных решений в сеть железных дорог России.

Для усовершенствования технологии ремонта тяговых электродвигателей подвижного состава необходима модернизация или замена существующего оборудования. Повышение производительности и обеспечение энергетической эффективности электрической тяги поездов возможно только путем устранения причин неудовлетворительной работы оборудования, применяемого на железной дороге [1].

Методика исследования

Тяговые двигатели подвергаются испытаниям после их изготовления или осуществления заводского и депоовского ремонта. Из-за того, что существующие регуляторы мощности имеют непосредственную связь с питающей сетью, все процессы, происходящие в цепи регуляторов, влияют на нее. Это негативное влияние проявляется в виде искажений трехфазного синусоидального напряжения питающей сети [2]. Также существующие регуляторы снижают действующие значения переменного напряжения. Сегодня на железной дороге перспективным направлением развития является не установка дополнительного фильтро-компенсирующего оборудования, которое направлено на устранение последствий негативной работы управляемых выпрямителей, а создание принципиально нового оборудования, которое будет устранять причину низкой

энергоэффективности и электромагнитной совместимости подвижного состава.

В связи с этим была разработана принципиально новая схема испытательной станции на базе регуляторов с управлением входного электрического сопротивления [3–6] (рис. 1). Конструктивно предлагаемые регуляторы мощности испытательной станции состоят из выпрямителя на диодах, сглаживающего реактора, промежуточного накопителя, IGBT-транзистора. Работа регуляторов мощности довольно проста и начинается с подачи трехфазного напряжения 380 В на вход выпрямителя. Затем, после заряда промежуточного накопителя до амплитудного значения, производится отбор электрической энергии с накопителя. Отбор осуществляется путем подачи импульсов управления на IGBT-транзистор. Импульсное напряжение прикладывается к обмотке возбуждения двигателя и обмоткам якоря двигателя и генератора. Напряжение к обмотке возбуждения генератора прикладывается от регулятора тока в обмотке возбуждения, который работает по такому же принципу.

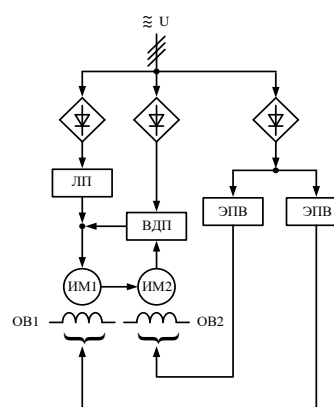


Рис. 1. Функциональная схема испытательной Станции тяговых электродвигателей подвижного состава

Fig. 1. Functional diagram of the test station of rolling stock traction motors

На основании функциональной схемы (см. рис. 1) была построена математическая модель испытательной станции тяговых электродвигателей с предлагаемыми регуляторами мощности в программе «Matrix laboratory» в среде Simulink. Далее представлены математические модели испытательной станции тяговых электродвигателей в двух режимах работы (рис. 2, 3). На рис. 2 испытательная станция работает в режиме пуска электродвигателя при коэффициенте заполнения IGBT-транзистора на $K_{зЛП} = 0,15$. На данном этапе испытательная станция способна развить скорость двигателя до половины

от номинальной – 400–500 об./мин. На рис. 3 представлена математическая модель испытательной станции в номинальном режиме работы [7-13]. При подаче тока на обмотку возбуждения генератора вступает в силу метод взаимной нагрузки, при котором скорость вращения двигателя-генератора достигает номинальной величины.

Результаты исследования

Математическое моделирование предлагаемых регуляторов мощности испытательной станции показывает, насколько эффективно можно использовать

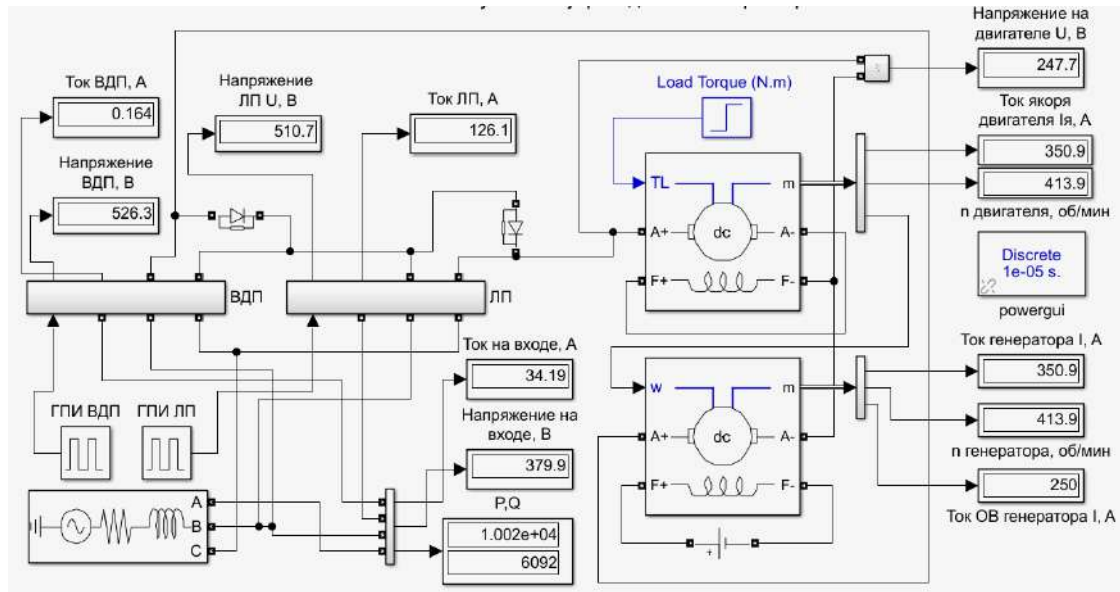


Рис. 2. Математическая модель испытательной станции тяговых электродвигателей:

$$K_z(LP) = 0,15; K_z(VDP) = 0,0; I_{OVB} = 0 \text{ A}$$

Fig. 2. Mathematical model of the traction motor test station:

$$K_z(LP) = 0,15; K_z(VDP) = 0,0; I_{OVB} = 0 \text{ A}$$

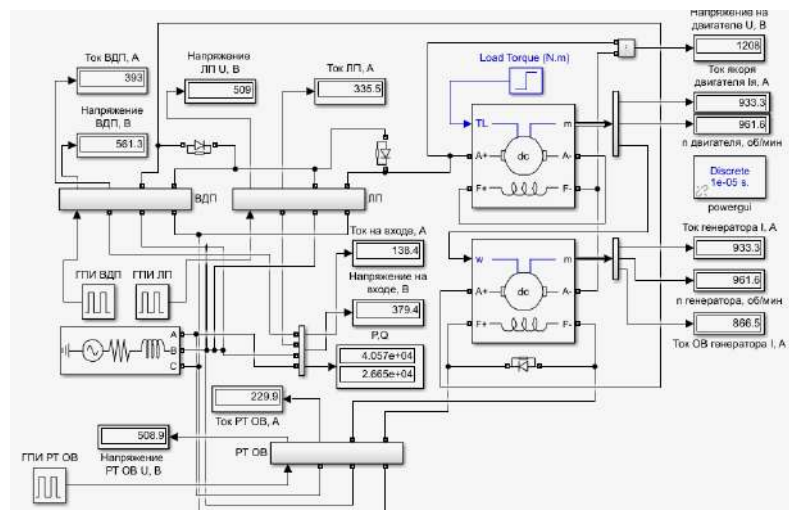


Рис. 3. Математическая модель испытательной станции тяговых электродвигателей в номинальном режиме работы: $K_z(LP) = 0,15; K_z(VDP) = 0,0; I_{OVB} = 250 \text{ A}$

Fig. 3. Mathematical model of the test station of traction electric motors in the nominal operating mode: $K_z(LP) = 0,15; K_z(VDP) = 0,0; I_{OVB} = 250 \text{ A}$

потенциал питающего напряжения во время пуска и разгона двигателя. Предлагаемые регуляторы мощности способны облегчить пуск двигателя путем потребления меньшего тока из сети. Это обеспечивается включением в цепь промежуточного накопителя, который предварительно заряжается от сети [14–18].

На рис. 4 представлена зависимость тока, протекающего в цепи якоря и обмотки возбуждения двигателя, а также в цепи якоря генератора от времени моделирования. На графике видно, как повышение коэффициента заполнения IGBT-транзистора регулятора мощности влияет на изменение тока в якорной цепи двигателя и генератора. В период времени от 2,5 до 10 с происходит увеличение коэффициента заполнения IGBT-транзистора регулятора мощности с помощью системы управления в

диапазоне от 0 до 15 %, ток в цепи якоря изменяется в диапазоне от 400 до 600 А.

На рис. 5 представлен график зависимости тока обмотки возбуждения генератора от времени моделирования. Для того чтобы довести электрические машины до половины от номинального режима работы, необходимо увеличить ток обмотки возбуждения генератора от 0 до 230 А, после того как коэффициент заполнения IGBT-транзистора регуляторов мощности достигнет 15 %.

Также посредством математического моделирования в компьютерной программе «MatLab» получилось оценить эффективность работы регуляторов мощности испытательной

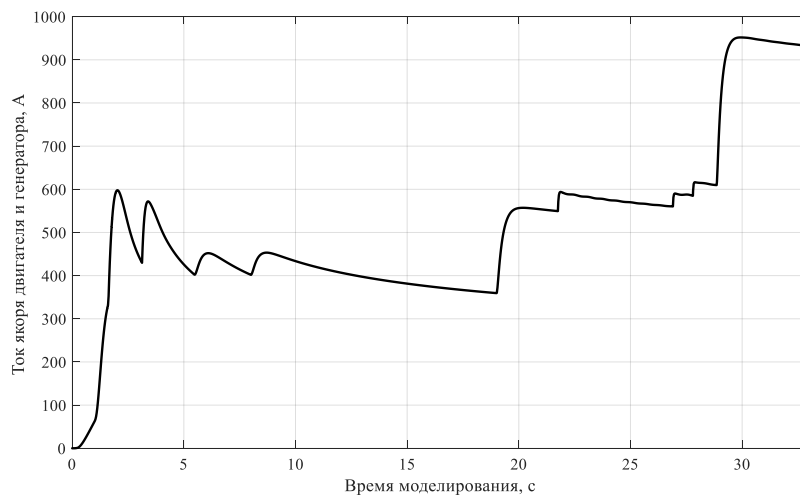


Рис. 4. График зависимости тока якоря двигателя и генератора от времени моделирования
Fig. 4. Graph of the dependence of the motor armature current and generator on the simulation time

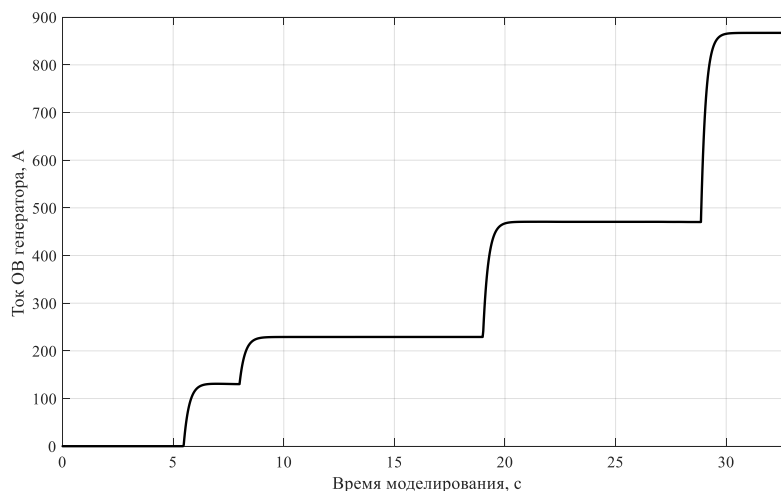


Рис. 5. График зависимости тока обмотки возбуждения генератора от времени моделирования
Fig. 5 Graph of the dependence of the generator field current on the simulation time

станции тяговых электродвигателей подвижного состава. На рис. 6 представлены осциллограммы тока и напряжения питающей сети, от которой работает испытательная станция на предлагаемых регуляторах мощности.

По представленным осциллограммам видно оказываемое влияние предлагаемых ре-

гуляторов мощности на питающую сеть. Кривая тока не отстает от кривой напряжения, а также отсутствует негативное влияние на кривую напряжения, которым отличается регулятор мощности на тиристорах. Также оценить энергетическую эффективность регуляторов мощности позволяет FFT-анализ (рис. 7, 8).

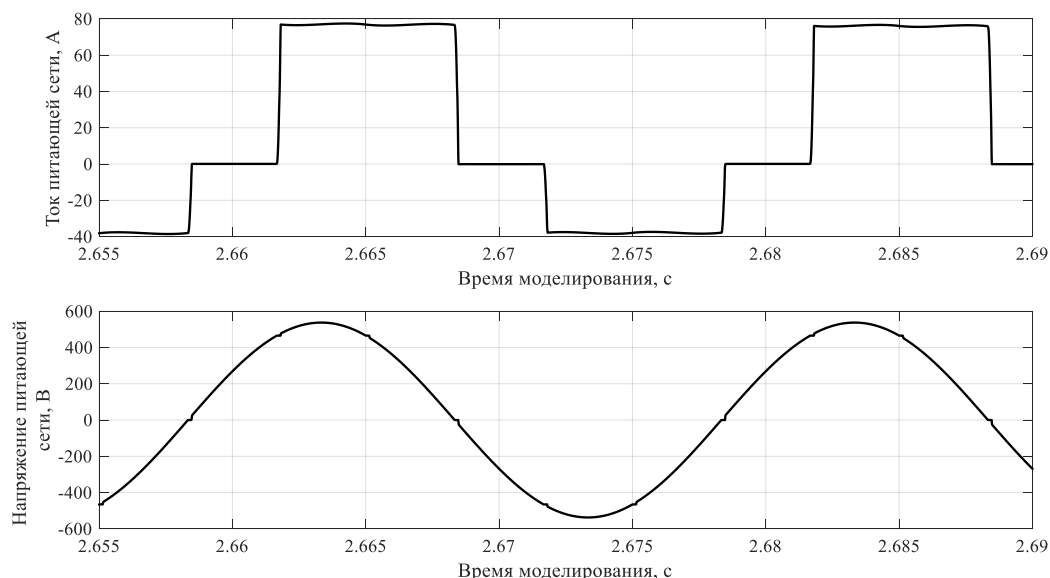


Рис. 6. Осциллограммы напряжения и тока питающей сети
Fig. 6. Oscillograms of voltage and current of the supply network

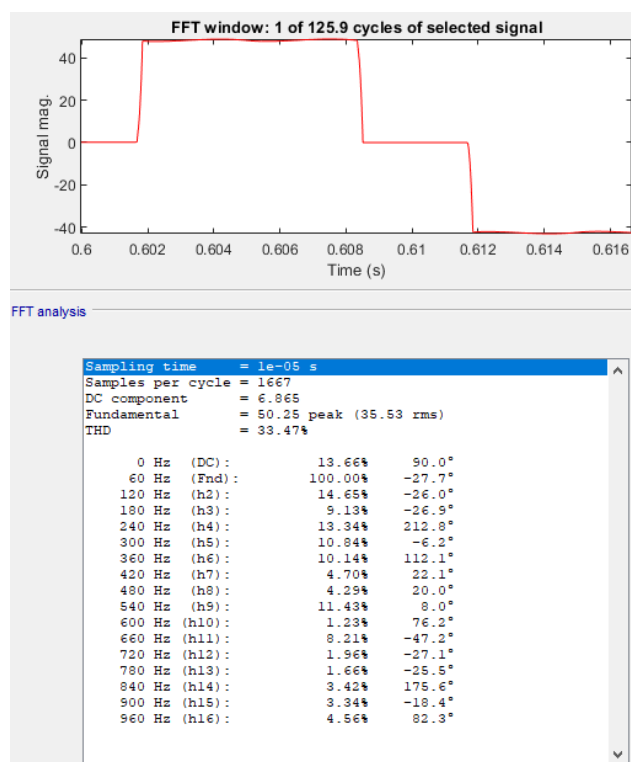


Рис. 7. FFT-анализ осциллограммы тока питающей сети
Fig. 7. FFT-analysis of main current waveform

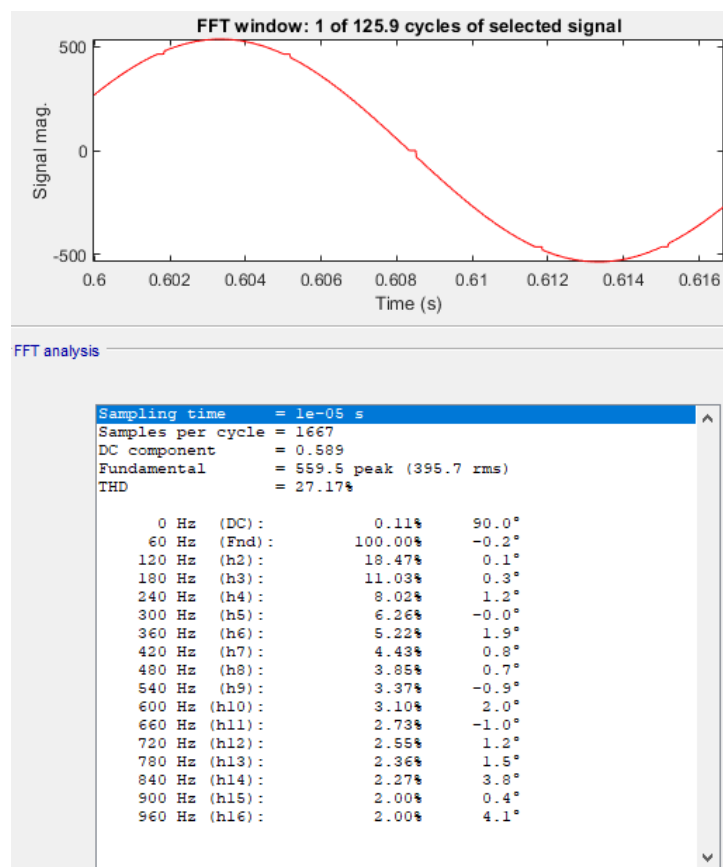


Рис. 8. FFT-анализ осциллограммы напряжения питающей сети

Fig. 8. FFT-analysis of main voltage waveform

Заключение

Из представленных данных можно сделать вывод, что при использовании выпрямителей на полупроводниковых диодах применяется весь потенциал источника питания сети. Предлагаемые регуляторы мощности позволяют не загружать питающую сеть дополнительными токами. Регуляторы

мощности, которые за счет изменения входного электрического сопротивления производят регулировку мощности станции, обеспечивают коэффициент мощности близкий к единице и высокую электромагнитную совместимость станции с питающей сетью на всем спектре регулировки мощности.

Список литературы

1. Маевский О.А. Энергетические характеристики вентильных преобразователей. М.: Энергия, 1978. 320 с.
2. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей. Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного университета, 1990. 219 с.
3. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. СПб.: Питер, 2009. Т. 2. 431 с.
4. Теоретические основы электротехники. Под ред. П.А. Ионкина. М.: Высшая школа, 1976. Т. 1. 544 с.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1996. 638 с.
6. Бадер М.П. Повышение эффективности тягового электроснабжения постоянного тока и обеспечение электромагнитной совместимости // Электроснабжение и водоподготовка. 2000. № 2. С. 62–66.
7. Prasuna P.V., Rama Rao J.V.G., Lakshmi Ch.M. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2013. Vol. 2 (4). P. 2368–3376.
8. Mohanraj K., Lanya Bersis C., Sekhar S. Power Electronics and Renewable Energy Systems, Proceedings of ICPERES, 2014. P. 29–38.
9. Jenella S., Radj Kumar V., Power Electronics and Renewable Energy Systems, Proceedings of ICPERES, 2014. P. 225–236.
10. Teigelkotter J., Sprenger D. Мощные преобразователи на IGBT-транзисторах для применения на железнодорожном подвижном составе. Мюнхен: Siemens AG, 2000.
11. Умов Н.А. Избранные сочинения. М.–Л.: Гостехиздат, 1950. 571 с.
12. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field / Philoactions of the Royal Society. London: 175, 1884. P. 343–361.

13. Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л., Якобчук К.П., Астраханцев Л.А. Уточненный закон сохранения энергии [Электронный ресурс]. 2015. URL: http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm. (дата обращения 17.10.2016).
14. Алексеева Т.Л., Рябченко Н.Л. Энергосберегающее использование электрической энергии // *Universum: Технические науки: электрон. научн. журн.* 2016. № 11(32). URL: <http://7universum.com/ru/tech/arhive/item/3865>.
15. Алексеева Т.Л., Рябченко Н.Л., Астраханцев Л.А. Technology of Electric Power Efficient Use in Transport. Материалы International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. SpringerLink, 2017. P. 120–133.
16. Воротилкин А.В., Михальчук Н.Л., Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л. Инновационные перспективы тягового электроподвижного состава. / Мир транспорта, М.: 2015, Т. 13, № 6. С. 62–76.
17. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника: Т. 2. М.: УМЦ ЖДТ, 2015. 307 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://e.lanbook.com/book/59179>.
18. 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.

References

1. Mayevsky O.A. Energeticheskiye kharakteristiki ventil'nykh preobrazovateley [Energy characteristics of valve converters]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 320 p.
2. Zinoviev G.S. Pryanuyemye metody rascheta energeticheskikh pokazateley ventil'nykh preobrazovateley [Direct methods for calculating the energy performance of valve converters]. Novosibirsk: Novosibirsk State University Publ., 1990. 219 p.
3. Demirchan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. [Theoretical foundations of electrical engineering]. SPb.: Piter Publ., 2009, Vol. 2. 431 p.
4. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Pod red. P.A. Ionkina [Theoretical foundations of electrical engineering. In Ionkina P.A. (ed.)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1976, Vol. 1. 544 p.
5. Bessonov L.A. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola, 1996. 638 p.
6. Bader M.P. Povysheniye effektivnosti tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka i obespecheniye elektromagnitnoy sovmestimosti [Increasing the efficiency of direct current traction power supply and ensuring electromagnetic compatibility]. *Elektrosnabzheniye i vodopodgotovka [Power supply and water treatment]*, 2000, No. 2, pp. 62–66.
7. Prasuna P.V., Rama Rao J.V.G., Lakshmi Ch.M. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2013, Vol. 2(4), pp. 2368–3376.
8. Mohanraj K., Lanya Bersis C., Sekhar S. Power Electronics and Renewable Energy Systems. *Proceedings of ICPERES*, 2014, pp. 29–38.
9. Jenella S., Radj Kumar V., Power Electronics and Renewable Energy Systems. *Proceedings of ICPERES*, 2014, pp. 225–236.
10. Teigelkotter J., Sprenger D. Moshchnyye preobrazovateli na IGBT-tranzistorakh dlya primeneniya na zheleznodorozhnom podvizhnom sostave [Powerful converters on IGBT transistors for use on railway vehicles]. Munich: Siemens AG, 2000.
11. Umov N.A. Izbrannyye sochineniya [Selected Works]. Moscow - Leningrad: Gostekhizdat, 1950. 571 p.
12. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field. *Philosactions of the Royal Society*. London: 175, 1884, pp. 343–361.
13. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Yakobchuk K.P., Astrakhantsev L.A. Utochnennyy zakon sokhraneniya energii [The updated law of conservation of energy], 2015. URL: http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm. Accessed: October 17, 2016.
14. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L. Energoberegayushcheye ispol'zovaniye elektricheskoy energii [Energy-saving use of electrical energy]. *Universum: Tekhnicheskkiye nauki: elektron. nauchn. zhurn.* [Universum: Technical sciences: electron. scientific. zhurn.], 2016, No. 11(32). URL: <http://7universum.com/ru/tech/arhive/item/3865>.
15. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A. Technology of Electric Power Efficient Use in Transport. *Materials of the International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017*. SpringerLink, 2017, pp. 120–133.
16. Vorotilkin A.V., Mikhalechuk N.L., Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L. Innovatsionnyye perspektivy tyagovogo elektropodvizhnogo sostava [Innovative perspectives of electric traction vehicles]. *Mir transporta [World of transport]*. Moscow, 2015, Vol. 13, No. 6, pp. 62–76.
17. Burkov A.T. *Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and converting equipment]*. Moscow: UMTs ZhDT, 2015, Vol. 2, 307 p. URL: <http://e.lanbook.com/book/59179>.
18. Dul'skii E.Yu. Modelirovaniye rezhimov IK-energopodvoda v tekhnologii prodleniya resursa tyagovykh elektricheskikh mashin s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov [Modeling of IR energy supply modes in the technology of extending the life of traction electric machines using the finite element method]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2013, No. 12(83), pp. 258–263.

Информация об авторах

Мартусов Алексей Леонидович – ассистент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: aleksey.martusov@yandex.ru

Information about the authors

Aleksey L. Martusov – assistant of the Electric Power Engineering Subdepartment of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: aleksey.martusov@yandex.ru

Предложения по организации ремонтных работ верхнего строения пути в условиях увеличения объемов перевозки грузов

Ю. М. Краковский✉, В. А. Начигин, В. В. Кашковский

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

✉ 7194926772@yandex.ru

Резюме

Для обеспечения необходимого уровня безопасности движения поездов большое внимание уделяется вопросам мониторинга и диагностики инфраструктурного комплекса, включая верхнее строение пути. Основным критерием назначения ремонта ВСП является пропущенный тоннаж. Однако в зависимости от условий эксплуатации, наличия различных кривых и прямых участков, подъемов и спусков, дополнительных системных внешних факторов, появляются неисправности на участках, различающиеся между собой в десятки раз. Первый комплекс предложений по поддержанию ВСП на высоком техническом уровне сводится к следующему: 1) для текущего содержания пути необходимо создавать мобильные небольшие комплексные бригады, которые в своей основе состоят из профессиональных специалистов и универсальных исполнителей; 2) высвободившееся от нерациональной деятельности по текущему содержанию ВСП ресурсы рекомендуется направить на проведение комплексных ремонтных работ. Основными видами обслуживания и ремонта ВСП являются: 1) ППР – планово-предупредительный ремонт; 2) ПР – подъемочный ремонт; 3) СР – средний ремонт; 4) УСР – усиленный средний ремонт; 5) КР – капитальный ремонт. Второй комплекс предложений заключается в проведении комплексного ремонта с учетом фактического состояния, которое определяется средствами диагностики и натурными осмотрами ВСП. Суть этих предложений заключается в следующем: а) при наступлении первого вида ремонта по пропущенному тоннажу прямые участки бесстыкового пути не требуют проведения каких-либо ремонтных работ; б) по мере увеличения нагрузки на рельс в зависимости от радиуса кривых и уклонов, количество неисправностей в рельсах, скреплениях, шпалах и балласте возрастает. Например, на кривых малого радиуса требуется сплошная смена рельсов с сопровождением работ в объеме СР; в) при наступлении последующих цикловых ремонтов большая часть участка (перегона) подвергается сложным видам ремонта; г) в итоге при достижении предельного технического состояния верхнего строения пути проводится КР всего перегона.

Ключевые слова

пропускная способность, ремонтно-восстановительные работы, верхнее строение пути, объем перевозки грузов

Для цитирования

Краковский Ю. М. Предложения по организации ремонтных работ верхнего строения пути в условиях увеличения объемов перевозки грузов / Ю. М. Краковский, В. А. Начигин, В. В. Кашковский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 135–141. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).135-141

Информация о статье

поступила в редакцию: 03.09.2021, поступила после рецензирования: 10.09.2021, принята к публикации: 15.10.2021

Proposals for repair works organization of the railway track upper structure to increase the volume of cargo transportation

Y. M. Krakovsky✉, V. A. Nachigin, V. V. Kashkowsky

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ 7194926772@yandex.ru

Abstract

To ensure the required level of train traffic safety, much attention is paid to monitoring and diagnostics of the infrastructure complex, including upper structure of the railway. The main criterion for appointing USR repair is the missed tonnage. However, depending on the operating conditions, the presence of various curves and straight sections, ascents and descents, additional systemic external factors, the of malfunctions on the track may appear, which differ from each other by tens of times. The first set of proposals for maintaining the USR at a high technical level is: 1) for the current maintenance of the track, it is necessary to create small mobile complex teams, consisting of professional specialists and universal performers; 2) direct the resources released from irrational activities to the current maintenance of the USR to carry out complex repair work. The main types of maintenance and repair of USR include: 1) PPR - preventive maintenance; 2) LR - lifting repair; 3) MR - medium repair; 4) EMR - enhanced medium repair; 5) CR - major repair. The second set of proposals involves a comprehensive repair, taking into account the actual state, which is determined by means of diagnostics and field inspections of the USR. The essence of the proposals is as follows: a) when the first type of repair occurs on the passed tonnage, the straight sections of the continuous welded

track do not require any repair work; b) as the load on the rail increases, depending on the radius of curves and slopes, the number of faults in rails, fasteners, sleepers and ballast also increases. For example, on small radius curves, a continuous replacement of rails is required, accompanied by work in the amount of MR; c) when it's time for subsequent cycle repairs, most of the section (stretch) is subjected to complex types of repair; d) eventually, when the critical technical condition of the track superstructure is reached, the major repair of the entire stretch is carried out.

Keywords

channel capacity, repair and restoration works, the upper structure of the railway, the volume of cargo transportation

For citation

Krakovsky Y. M., Nachigin V. A., Kashkowsky V. V. Analiz vliyaniya obratnogo tyagovogo toka na rabotu rel'sovyh cepej [Proposals for repair works organization of the railway track upper structure to increase the volume of cargo transportation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 135–141. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).135-141

Article Info

Received: 03.09.2021, Revised: 10.09.2021, Accepted: 15.10.2021

Введение

Исторически железнодорожные перевозки в нашей стране занимают лидирующее положение по сравнению с другими видами транспорта. Учитывая необходимость обеспечения безопасности перевозочного процесса, ОАО «РЖД» уделяет большое внимание надежности и технологичности инфраструктурного комплекса дорог [1, 2]. Это, в свою очередь, требует больших финансовых и инвестиционных средств.

Развитие технологий увеличения пропускной способности железнодорожной сети благоприятно сказывается на увеличении объемов перевозок. А рост объёмов сказывается на снижении общих относительных расходов на перевозочный процесс и повышает привлекательность железнодорожных перевозок.

В то же время увеличение количества поездов в определённый период вступает в противоречие с содержанием, обслуживанием и ремонтом инфраструктуры, включая верхнее строение пути (ВСП). Для оценки данной ситуации необходимо определиться с технологиями, обеспечивающими требуемые объёмы и необходимое качество перевозочного процесса.

Таким образом, необходимость роста объемов перевозок и развитие инфраструктурного комплекса очень тесно связаны между собой. Поиск компромиссных решений в условиях неопределенности и ограниченных финансовых ресурсов является важнейшей задачей, требующей своего решения.

Целью данной работы является выработка предложений по организации ремонтных работ ВСП, позволяющих увеличить объемы перевозки грузов.

Состояние ремонтно-восстановительных работ инфраструктурного комплекса

В ОАО «РЖД» для обеспечения необходимого уровня безопасности движения поездов уделяется внимание вопросам мониторинга и диагностики инфраструктурного комплекса [3-6]. Эти вопросы ре-

шаются с применением различных средств и методов с одновременным стремлением сокращения финансовых и других ресурсов.

На первоначальном этапе использовалась организация работ по техническому состоянию. Критерием начала ремонтных и профилактических работ служил отказ технического средства выполнять свои функциональные обязанности в процессе производства. По мере накопления статистического материала о состоянии инфраструктуры и развития диагностических средств выстроилась система содержания инфраструктуры, состоящая из диагностики, в том числе встроенной, мониторинга, текущего содержания (по системе ТО), полного восстановления технических параметров системы (реконструкция, капитальный ремонт и т.д.).

Вся эта система не может работать при движении поездов, так как любой элемент системы требует ограничения от движения будь то локомотив, вагон, рельс, светофор или любое другое техническое средство, используемое для организации движения поездов.

С увеличением количества поездов в единицу времени возможности для организации работы диагностических средств снижаются по причине асимметричности в графике движения из-за различных условий эксплуатации и потребностей в дополнительных «нитках» графика.

Аналогично происходит и с организацией текущего обслуживания инфраструктуры, когда интервалы движения между поездами ограничивают возможности в надежном содержании, а при дальнейшей интенсификации движение препятствуют выполнению ремонтных работ. Соответственно средства, предназначенные для поддержания в работоспособном состоянии технических средств, на первом этапе используются не эффективно. Все работы приходится проводить в технологические перерывы в движении поездов. Потребности в «окнах» растут при снижении эффективности используемых средств.

Одним из направлений является комплексная оценка ВСП, включающая оценку состояния пути и разработку мероприятий по его обслуживанию и ремонту, а также прогнозированию технического состояния.

Можно выделить такие направления диагностики и мониторинга:

1) диагностические комплексы различного назначения, например ЭРА, ИНТЕГРАЛ;

2) средства неразрушающего контроля рельсов в виде вагонов-дефектоскопов и других технических средств;

3) компьютеризованные вагоны лаборатории производства фирмы «НПЦ Инфотранс»;

4) путеизмерительные вагоны и их модификации и др.

В рамках одного комплекса автоматизированной оценки состояния железнодорожной инфраструктуры «ИНТЕГРАЛ» объединено множество различных подсистем контроля, позволяющих измерять и обрабатывать более ста параметров состояния различных объектов. Данный комплекс позволяет объединять несколько диагностических вагонов. Также можно выделить совмещенные вагоны-дефектоскопы АВИКОН-03М [7], вагон дефектоскоп-путеизмеритель «Декарт», разработанный группой компаний «Гвема» и широко используемый на Улан-Баторской железной дороге [8].

Отметим также работы, связанные с оценкой бокового износа рельсов и прогнозированием их остаточного ресурса [9].

Развиваемый комплексный подход по обслуживанию и ремонту инфраструктурного комплекса направлен на внедрение технологии, связанной с постепенным переходом на обслуживание по техническому состоянию.

Повышение пропускной и провозной способности железнодорожной сети

Одной из важнейших задач, решаемых в ОАО «РЖД», является повышение пропускной и провозной способности железнодорожной сети. Эта задача решается различными технологиями и средствами [10-12]: внедрением комплексных полигонных технологий, изменением ЕСПП, модернизацией и совершенствованием систем интервального регулирования движения поездов, обеспечением интероперабельности перевозок, за счет организации вождения соединенных поездов на постоянной основе.

Отметим работу [13], в которой повышение провозной способности дистанций пути предлагается осуществлять за счет рациональной организации «окон», необходимых для выполнения ремонтно-восстановительных работ. В качестве примера выбран перегон Дальневосточной железной дороги «Ванино–Дюанка», который характеризуется полным исчерпанием провозных возможностей. В работе по-

казано, что за счет уменьшения доли подготовительно-заключительных работ и правильной организации «окон», можно сократить число «потерянных» пар грузовых поездов с 38 до 10 и тем самым получить значительный экономический эффект.

Учитывая развитие полигонных технологий [14-16], систем мониторинга и диагностики, позволяющих оценивать техническое состояние пути и исследовать влияние отказов технических средств на выполнение графиков движения поездов [17, 18], необходимость повышения объемов перевозимых грузов, в ОАО «РЖД» изменена структура и перераспределены функции ремонтных работ по направлениям.

Отметим важность повышения объемов перевозимых грузов для восточного полигона, что также требует изменения организации ремонтных работ ВСП. Сошлемся на работу [13], в которой показана актуальность подобных исследований для восточного полигона на примере Дальневосточной железной дороги, которая взаимодействует с морскими портами и пограничными переходами.

В центральной дирекции диагностики инфраструктуры выделено четыре направления:

1) текущее содержание пути, осуществляемое региональными службами пути. В их составе имеются подразделения по содержанию и ремонту инженерных сооружений, эксплуатации тоннелей, мостов, труб, путепроводов и иных сооружений;

2) вопросы мониторинга и диагностики, осуществляемые центрами диагностики и мониторинга;

3) капитальный и восстановительный ремонт, осуществляемый дирекциями ремонта пути;

4) ремонт и эксплуатация машин и механизмов, осуществляемых дирекцией по ремонту и эксплуатации путевых машин совместно со специализированными предприятиями.

Необходимость повышения объемов перевозки грузов, особенно за счет повышения пропускной и провозной способности железнодорожной сети, включая уменьшение интервалов между поездами, не позволяет проводить даже не трудоемкий ремонт пути без «окон». Если максимальный интервал между поездами меньше минимальной трудоемкости ремонтных работ на определенном участке железнодорожной сети, то проведение ремонтных работ без остановки движения поездов невозможно.

Существующий подход к ремонту и обслуживанию ВСП и предложения по его улучшению

На рис. приведен фрагмент участка «Большой Луг-Слюдянка» на Восточно-Сибирской железной дороге. Этот участок содержит значительное число кривых с различными радиусами (R) и прямых участков. Таких участков на железнодорожной сети

достаточно много. Путь на этих участках изнашивается с различной интенсивностью, что желательно учитывать при их обслуживании и ремонте.

Для четкого понимания излагаемых предложений необходимо рассмотреть причины различных неисправностей, появляющихся на пути. Они определяются двумя основными видами: недостатками конструкции, воздействием подвижного состава

Рассмотрим вторую составляющую, где воздействие от колеса передается на рельс и далее на все элементы конструкции пути и земляного полотна. На интенсивность взаимодействия наибольшее воздействие оказывают план и профиль линии, вписывание колесных пар и применение активаторов трения. В зависимости от радиусов в кривых участках пути интенсивность бокового износа может достигать величин от 0,3 до 0,4 мм/млн. т. А это, в условиях грузонапряженности более 150 млн. т./год, создаёт сложности в организации текущего содержания пути и сохранения высокой технической готовности инфраструктуры.

Как уже отмечалось, в настоящий момент основные средства диагностики сосредоточены в региональных дирекциях по диагностике и мониторингу состояния путевого комплекса.

Инженерные сооружения тоже в целом переданы в специализированные предприятия по эксплуатации тоннелей, мостов, труб, путепроводов и иных сооружений. Следовательно, бюджет дистанций пути практически в полном объеме направлен на текущую эксплуатацию. В среднем он составляет от 300 до 700 млн. рублей ежегодно.

Основным критерием назначения ремонта ВСП является пропущенный тоннаж (млн. т.). Однако в зависимости от условий эксплуатации, наличия различных кривых и прямых участков (рис.), подъемов и спусков, дополнительных системных внешних факторов (применение активаторов трения и др.), приводят к появлению неисправностей на пути, различающихся между собой в десятки раз.

Основными видами обслуживания и ремонта ВСП являются:

1) ППР – планово-предупредительный ремонт;

2) ПР – подъемочный ремонт;

3) СР – средний ремонт;

4) УСР – усиленный средний ремонт;

5) КР – капитальный ремонт.

Предлагаемая схема содержания пути на протяжении жизненного цикла ВСП в зависимости от плана и профиля, грузонапряженности представляется в виде комплекса работ, состоящего из различных циклов.

В первый цикл выполняются работы по достижению ППР на участке в зависимости от пропущенного тоннажа и фактического состояния пути на перегоне: ППР, смена рельсов.

При следующем достижении нормативного срока выполняются такие работы: ППР, ПР, смена рельсов.

При наступлении третьего цикла комплекс работ состоит из ППР, ПР, СР со сплошной сменой рельсов.

Далее выполняются работы по следующему порядку: КР, СР со сменой рельсов, ПР, ППР.

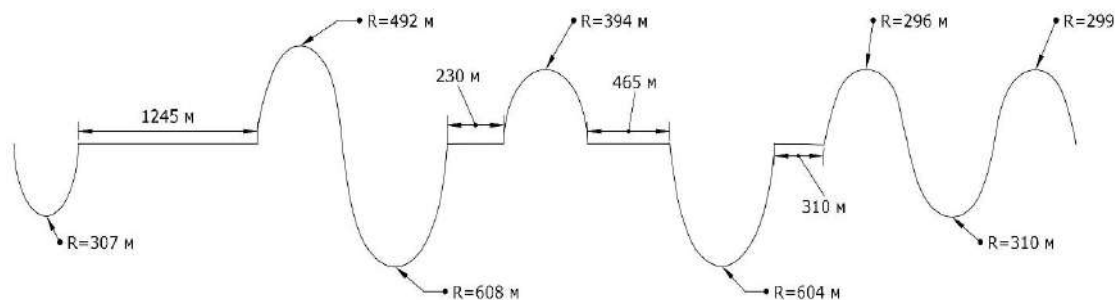
В дальнейшем могут повторяться четыре перечисленных цикла работ, после чего наступает выполнение капитального ремонта в целом по участку (перегону).

Фактически мы переходим к новому этапу эксплуатации ВСП в течение жизненного цикла по техническому состоянию без организации классического текущего содержания пути.

При грузонапряженности значительно превышающей 100 млн.т./год вероятно одиночная смена рельсов в кривых радиусом менее 400 метров и наступлении капитального ремонта в целом по участку после первого комплекса выполненных работ. В зависимости от внешних условий и воздействия подвижного состава возможны и другие схемы организации работ на ВСП.

Предложения по организации ремонтных работ ВСП

Предложения по поддержанию ВСП на высоком техническом уровне через систему проведения комплексного технического обслуживания сводятся к следующему:



Фрагмент участка «Большой Луг-Слюдянка»
Fragment of the section «Bolshoy Lug-Slyudyanka»

1) для текущего содержания пути необходимо создавать мобильные небольшие комплексные бригады, которые в своей основе состоят из профессиональных специалистов и универсальных исполнителей;

2) высвободившееся от нерациональной деятельности ресурсы по текущему содержанию ВСП направить на проведение комплексных ремонтных работ.

Предложения по второму направлению заключаются в проведении комплексного ремонта с учетом фактического состояния, которое определяется средствами диагностики и натурными осмотрами ВСП.

Суть последних предложений заключается в следующем:

а) при наступлении первого вида ремонта по пропущенному тоннажу прямые участки бесстыкового пути не требуют проведения каких-либо ремонтных работ;

б) по мере увеличения нагрузки на рельс в зависимости от радиуса кривых и уклонов, количество неисправностей в рельсах, скреплениях, шпалах и балласте возрастает. Например, на участке (рис. 1) в кривых малого радиуса требуется сплошная смена рельсов с сопровождением работ в объеме СР;

в) при наступлении последующих цикловых ремонтов большая часть участка (перегона) подвергается сложным видам ремонта;

г) в итоге при достижении предельного технического состояния верхнего строения пути проводится КР всего перегона.

Таким образом, данное комплексное предложение позволяет без ухудшения технического состояния, при сохранении достаточного уровня безопасности, возможности повышения объемов перевозки, существенно сократить суммарные расходы на жизненный цикл ВСП.

Отметим, что предлагаемый подход потребует:

- проведения обследования состояния пути для разработки технологических процессов;
- разработки технологических процессов для каждого конкретного участка с учетом технического состояния верхнего строения пути;
- обеспечения сбалансированности по ресурсам технологических процессов;
- проведения обучения руководителей и персонала до начала производства работ.

Заключение

В ОАО «РЖД» для обеспечения необходимого уровня безопасности движения поездов большое

внимание уделяется вопросам мониторинга и диагностики инфраструктурного комплекса. Эти вопросы решаются с применением различных средств и методов с одновременным стремлением сокращения финансовых и других ресурсов. Основным критерием назначения ремонта ВСП является пропущенный тоннаж. Однако в зависимости от условий эксплуатации, наличия различных кривых и прямых участков, подъемов и спусков, дополнительных системных внешних факторов, появляются неисправности на участках пути, различающихся между собой в десятки раз.

Первый комплекс предложений по поддержанию ВСП на высоком техническом уровне сводится к следующему:

1) для текущего содержания пути необходимо создавать мобильные небольшие комплексные бригады, которые в своей основе состоят из профессиональных специалистов и универсальных исполнителей;

2) высвободившееся ресурсы от нерациональной деятельности по текущему содержанию ВСП необходимо направить на проведение комплексных ремонтных работ.

Предложения по второму направлению заключаются в проведении комплексного ремонта с учетом фактического состояния, которое определяется средствами диагностики и натурными осмотрами верхнего строения пути. Суть этих предложений заключается в следующем:

а) при наступлении первого вида ремонта по пропущенному тоннажу прямые участки бесстыкового пути не требуют проведения каких-либо ремонтных работ;

б) по мере увеличения нагрузки на рельс в зависимости от радиуса кривых и уклонов, количество неисправностей в рельсах, скреплениях, шпалах и балласте возрастает.

Например, на кривых малого радиуса требуется сплошная смена рельсов с сопровождением работ в объеме СР;

в) при наступлении последующих цикловых ремонтов большая часть участка (перегона) подвергается сложным видам ремонта;

г) в итоге при достижении предельного технического состояния ВСП проводится КР всего перегона.

Разработанные предложения особенно важны для восточного полигона, как лидера полигонных технологий на железнодорожной сети.

Список литературы

1. Краковский Ю.М. Моделирование перевозочного процесса железнодорожным транспортом: анализ, прогнозирование, риски / Ю.М. Краковский, С.К. Каргапольцев, В.А. Начигин; под ред. проф. Ю.М. Краковского. – Санкт-Петербург: «ЛИТЕО», 2018. – 240 с.

2. Федоров Ю.Н. Повышение эффективности управления холдингом «РЖД» за счет формирования оптимальной структуры органов регионального управления основной деятельностью / Ю.Н. Федоров // Экономика железных дорог. 2013. №11. С. 41-46.
3. Бирюзов В.П. Об основных направлениях развития систем диагностики и мониторинга путевого хозяйства до 2025 г. / В.П. Бирюзов // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 4. С. 4-8.
4. Бугаенко В.М. Мониторинг и диагностика инфраструктуры скоростных мобильных комплексов / В.М. Бугаенко // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 4. С. 12-16.
5. Антипов А.Г. Новые возможности магнитодинамического метода контроля рельсов / А. Г. Антипов, А. А. Марков // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 8. – С. 27-32.
6. Начигин В.А. Об определении остаточного ресурса рельсов // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 26-28.
7. Марков А.А. Комплексный анализ состояния рельсового пути с помощью нового вагона-дефектоскопа АВИКОН-03М / А.А. Марков и др. // В мире неразрушающего контроля. – 2013. – № 3(61). – С.74-79.
8. Даваадорж Батбаатар. Мониторинг железнодорожного пути на Улан-Баторской железной дороге / Б. Даваадорж // Материалы седьмой международной НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск: – 2016. – Том 1. – С. 411-415.
9. Краковский Ю.М. Прогнозирование бокового износа рельсов как процедура оценки их остаточного ресурса / Ю.М.Краковский, В.А. Начигин // Контроль. Диагностика. – 2010. – №6. – С. 30-35.
10. Осьминин А.Т. Обеспечение интероперабельности перевозок / А.Т. Осьминин, М.И. Мехедов, Д.В. Медников // Железнодорожный транспорт. 2019. №7. С. 11-17.
11. Розенберг Е.Н. Перспективы роста пропускной способности участков / Е.Н. Розенберг, В.В. Аношкин // Железнодорожный транспорт. 2020. №3. С. 4-7.
12. Сотников Е.А. Интенсификация роста загруженных направлений сети железнодорожных дорог / Е.А. Сотников, М.И. Мехедов, П.С. Холодык // Железнодорожный транспорт. 2020. №3. С.11-14.
13. Краковский Ю.М. Повышение провозной способности сети за счет рациональной организации ремонтно-восстановительных работ пути / Ю.М. Краковский, В.А. Начигин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 66 № 2. – С. 109–115. – DOI: 10.26731/1813-9108. 2020. 2(66). С. 109-115.
14. Хоменко А.П. Комплексная полигонная технология эксплуатационной работы / В.Ф. Фролов, А.П. Хоменко // Железнодорожный транспорт. 2016. №2. С. 43-46.
15. Колокольников В.С. Расчет и оптимизация полигонов железнодорожного транспорта / П.А. Козлов, В.С. Колокольников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. - № 3 (67). – С. 96-101.
16. Фролов В.Ф. Новые подходы к управлению перевозочным процессом в условиях динамичного изменения внешней среды / В.Ф. Фролов // Железнодорожный транспорт. 2014. №4. С. 14-18.
17. Краковский Ю.М. Оценка технического состояния рельсов по данным мониторинга пути / Ю.М. Краковский, В.А. Начигин, А.В. Начигин // Вестник ВНИИЖТ. 2012. №5. С. 40-43.
18. Колокольников В.С. Влияние отказов технических средств на выполнение графика движения поездов / И.А. Ковалев, В.С. Колокольников // Транспорт Урала. – 2014. - № 2 (41). – С. 54-57.

References

1. Krakovsky Yu.M., Kargapoltsev S.K., Nachigin V.A. Modelirovaniye perevozochnogo protsessa zheleznodorozhnyim transportom: analiz, prognozirovaniye, riski. Pod red. Yu.M. Krakovskogo [Modeling of the transportation process by rail: analysis, forecasting, risks. In Krakovsky Yu.M. (ed.)]. SPb.: LITEO, 2018. 240 p.
2. Fedorov Y.N. Povysheniye effektivnosti upravleniya kholdingom «RZHD» za schet formirovaniya optimal'noy struktury organov regional'nogo upravleniya osnovnoy deyatel'nost'yu [Improving the management efficiency of the Russian Railways holding due to the formation of the optimal structure of regional management bodies for core activities]. *Ekonomika zheleznykh dorog [Economics of Railways]*, 2013, No. 11, pp. 41–46.
3. Biryuzov V.P. Ob osnovnykh napravleniyakh razvitiya sistem diagnostiki i monitoringa putevogo khozyaystva do 2025 g. [About the main directions of development of systems of diagnostics and monitoring of track facilities up to 2025]. *Put' i putevoye khozyaystvo [Path and track management]*, 2016, No. 4, pp. 4–8.
4. Bugaenko V.M. Monitoring i diagnostika infrastruktury skorostnykh mobil'nykh kompleksov [Monitoring and diagnostics of infrastructure of high-speed mobile complexes]. *Put' i putevoye khozyaystvo [Path and track management]*, 2015, No. 4, pp. 12–16.
5. Antipov A.G., Markov A.A. Novyye vozmozhnosti magnitodinamicheskogo metoda kontrolya rel'sov [New possibilities of the magnetodynamic method of rail inspection]. *Put' i putevoye khozyaystvo [Path and track management]*, 2016, No. 8, pp. 27–32.
6. Nachigin V.A. Ob opredelenii ostatochnogo resursa rel'sov [On the determination of the residual life of the rails]. *Put' i putevoye khozyaystvo [Path and track management]*, 2015, No. 8, pp. 26–28.
7. Markov A.A. et al. Kompleksnyy analiz sostoyaniya rel'sovogo puti s pomoshch'yu novogo vagona-defektoskopa AVIKON-03M [Comprehensive analysis of the state of the rail track using a new flaw detector car AVIKON-03M]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya [In the world of non-destructive testing]*, 2013, No. 3(61), pp.74–79.
8. Davaadorj Batbaatar. Monitoring zheleznodorozhnogo puti na Ulan-Batorskoy zheleznoy doroge [Monitoring of the railway track on the Ulan Bator railway]. *Materialy sed'moy mezhdunarodnoy NPK «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona» [Materials of the seventh international research and production complex "Transport infrastructure of the Siberian region"]*. Irkutsk, 2016, Vol. 1, pp. 411–415.

9. Krakovsky Yu.M., Nachigin V.A. Prognozirovaniye bokovogo iznosa rel'sov kak protsedura otsenki ikh ostatochnogo resursa [Forecasting of lateral wear of rails as a procedure for assessing their residual life]. *Kontrol'. Diagnostika [Control. Diagnostics]*, 2010, No. 6, pp. 30–35.
10. Osminin A.T., Mekhedov M.I., Mednikov D.V. Obespecheniye interoperabel'nosti perevozok [Ensuring interoperability of transport]. *Zheleznodorozhnyy transport [Railway transport]*, 2019, No. 7, pp. 11–17.
11. Rosenberg E.N., Anoshkin V.V. Perspektivy rosta propusknoy sposobnosti uchastkov [Prospects for increasing the throughput capacity of sections]. *Zheleznodorozhnyy transport [Railway transport]*, 2020, No. 3, pp. 4–7.
12. Sotnikov E.A., Mekhedov M.I., Kholodnyak P.S. Intensifikatsiya rosta zagruzhennykh napravleniy seti zheleznodorozhnykh dorog [Intensification of growth of loaded directions of the railway network]. *Zheleznodorozhnyy transport [Railway transport]*, 2020, No. 3, pp. 11–14.
13. Krakovsky Yu.M., Nachigin V.A. Povysheniye provoznoy sposobnosti seti za schet ratsional'noy organizatsii remontno-vosstanovitel'nykh rabot puti [Increasing the carrying capacity of the network due to the rational organization of repair and restoration work of the track]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2020, Vol. 66, No. 2, pp. 109–115. DOI: 10.26731 / 1813-9108.2020.2(66).109-115.
14. Khomenko A.P., Frolov V.F. Kompleksnaya poligonnyaya tekhnologiya ekspluatatsionnoy raboty [Complex polygon technology maintenance]. *Zheleznodorozhnyy transport [Railway transport]*, 2016, No. 2, pp. 43–46.
15. Kolokolnikov V.S., Kozlov P.A. Raschet i optimizatsiya poligonov zheleznodorozhnogo transporta [Calculation and optimization of railway transport polygons]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of Rostov State Transport University]*, 2017, No. 3(67), pp. 96–101.
16. Frolov V. F. Novyye podkhody k upravleniyu perevozhnym protsessom v usloviyakh dinamichnogo izmeneniya vneshney sredy [New approaches to managing the transportation process in the conditions of dynamic changes in the external environment]. *Zheleznodorozhnyy transport [Railway transport]*, 2014, No. 4, pp. 14–18.
17. Krakovsky Yu.M., Nachigin V.A., Nachigin A.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya rel'sov po dannym monitoringa puti [Evaluation of the technical state of rails according to the monitoring path]. *Vestnik VNIIZHT [Bulletin VNIIZHT]*, 2012, No. 5, pp. 40–43.
18. Kolokolnikov V.S., Kovalev I.A. Vliyaniye otkazov tekhnicheskikh sredstv na vypolneniye grafika dvizheniya poyezdov [Influence of failures of technical means on the fulfillment of the train schedule]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2014, No. 2(41), pp. 54–57.

Информация об авторах

Краковский Юрий Мечеславович – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: 71949267772@yandex.ru

Начигин Владимир Александрович – кандидат технических наук, начальник Инновационно-технологического центра развития Восточного полигона, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: nachiginv@yandex.ru

Кашковский Виктор Владимирович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kww542339@km.ru

Information about the authors

Yuriy M. Krakovsky – Doctor of Engineering Science, Pro. At the Subdepartment of System of Informatics and Information Protection, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: 71949267772@yandex.ru

Vladimir A. Nachigin – Ph.D., Head of the Innovation and Technology Center for the Development of the Eastern polygon, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: nachiginv@yandex.ru

Viktor V. Kashkovskii – Doctor of Engineering Science, Senior Research Officer, Professor of the Subdepartment of Information Systems and Information Protection, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kww542339@km.ru

Сравнительный анализ энергоёмкости и производства парниковых газов автомобильным и железнодорожным транспортом

Э. А. Рагимов✉

Национальная академия наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика

✉ elmar_rahimov@yahoo.com

Резюме

По данным Всемирной организации здравоохранения, качество воздуха ухудшается с каждым годом. Этот случай связан в первую очередь с энергетической, транспортной и промышленной политикой стран и городов, которые начинают быть прямой причиной международных проблем, связанных с парниковым эффектом. В настоящее время экологические особенности транспорта, в основном потребление энергии и производство парниковых газов, являются очень актуальными проблемами. В статье приведено сравнение энергопотребления и производства парниковых газов в двух видах транспорта – автомобильном и железнодорожном. Сравнение сделано для дизельных железнодорожных транспортных средств, а также для легковых автомобилей с различными видами топлива (бензин и дизельное топливо). Результаты показывают окончательные экологические аспекты, рассчитанные на душу населения в Азербайджанской Республике, и имеют высокую информативную ценность, поскольку учитывают потребление энергии и выбросы из первичных и вторичных источников. Расчет производился по фактическим значениям расхода топлива (автомобильным транспортом) и путем моделирования энергопотребления (железнодорожном). Энергетические и эмиссионные коэффициенты из стандарта EN были использованы для оценки результатов. Установлено, что «неэкологичные транспортные средства» – автомобили – могут быть очень эффективными в плане потребления энергии и производства парниковых газов в Азербайджанской Республике.

Ключевые слова

экологические аспекты, энергопотребление, производство парниковых газов, автомобильный транспорт, железнодорожный транспорт

Для цитирования

Рагимов Э. А. Сравнительный анализ энергоёмкости и производства парниковых газов автомобильным и железнодорожным транспортом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 142–148. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).142-148

Информация о статье

поступила в редакцию: 07.09.2021, поступила после рецензирования: 11.09.2021, принята к публикации: 15.10.2021

Comparative analysis of energy intensity and greenhouse gas production by road and rail transport

E. A. Ragimov✉

Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Republic of Azerbaijan

✉ elmar_rahimov@yahoo.com

Abstract

According to the World Health Organization, air quality is worsening every year. This is mainly due to the energy, transport and industrial policies of countries and cities, which are beginning to be a direct cause of international problems related to the greenhouse effect. At present, the environmental features of transport, especially energy consumption and the production of greenhouse gases, are very topical problems. The article provides a comparison of energy consumption and the generation of greenhouse gases in two types of transport - road and rail. Comparison is made for diesel railway vehicles, as well as for cars with various types of fuel (gasoline and diesel fuel). The outcomes demonstrate the final ecological issues calculated per capita in the Republic of Azerbaijan and are of high informative value, since they consider energy consumption and emissions from primary and secondary sources. The calculation was carried out by the actual values of fuel consumption (road) and by modelling energy consumption (railway). The energy and emission factors EN standard were applied for evaluating the outcomes. The results also show that “non-green vehicles” – motcars – can be very efficient in energy consumption and greenhouse gas production in the Republic of Azerbaijan. The aim of the study is to demonstrate that the use of the capabilities of vehicles is very important when assessing and comparing different modes of transport or different vehicles in terms of their environmental impact.

Keywords

ecological aspects, energy consumption, greenhouse gas production, road transport, rail transport

For citation

Ragimov E. A. Sravnitel'nyj analiz ehnergoyomkosti i proizvodstva parnikovykh gazov avtomobil'nym i zheleznodorozhnym transportom [Comparative analysis of energy intensity and greenhouse gas production by road and rail transport]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 142–148. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).142-148

Article info

Received: 07.09.2021, Revised: 11.09.2021, Accepted: 15.10.2021

Введение

Мобильность – одна из самых важных человеческих потребностей в этом столетии. Среднее количество поездок и среднее пройденное расстояние на человека постоянно увеличивается. Текущая экономическая ситуация напрямую зависит от транспорта. Последующие действия, ведущие к созданию ценных продуктов и услуг, которые отвечают потребностям общества и отдельного человека, не могут быть реализованы без транспортировки товаров или услуг населению [1, 2].

Сегодня транспортировка в значительной степени зависит от нефти, так как подавляющее большинство транспортных средств приводятся в движение двигателями, сжигающими нефтепродукты – углеводородное топливо [3, 4]. Особенно это касается автомобильного, воздушного и водного транспорта. Большинство рельсовых транспортных средств в настоящее время приводятся в движение электрическими тяговыми двигателями, поэтому они не зависят от масла так сильно, как перечисленные виды транспорта [5].

Транспорт становится очень важным элементом человеческого существования, который оказывает негативное влияние на окружающую среду из-за шума, вибрации, несчастных случаев, потребностей территории, заторов и энергоемкости [6]. Поступающая энергия преобразуется в движение транспортных средств, обеспечивающих передачу товаров и людей в этом районе.

Железнодорожный транспорт является типичным видом транспорта, где большинство железнодорожных транспортных средств в настоящее время работают на тяговых электродвигателях, поэтому степень зависимости от нефти ниже, чем у автотранспорта. Но дело в том, что в большинстве стран электроэнергия производится из нефтепродуктов или угля [7, 8]. Все это невозобновляемые природные ресурсы, и их запасы постоянно сокращаются.

Стандарт EN 16258:2012 и его использование в расчетах

Этот европейский стандарт устанавливает общую методологию для расчета и декларирования потребления энергии и выбросов парниковых газов в связи с любыми услугами (груз, пассажиры или и то, и другое) [9, 10]. Он устанавливает общие принципы, определения, системные границы, методы расчета, правила распределения (распределение,

назначение) и рекомендации по информации для поддержки стандартизированных, точных, надежных и проверяемых деклараций относительно потребления энергии и выбросов парниковых газов, связанных с любой грузовой службой. Он также содержит примеры использования этих принципов. Расчет для одной данной транспортной услуги должен выполняться с использованием следующих трех основных этапов:

1. Идентификация различных разделов сервиса.
2. Расчет потребления энергии и выбросов парниковых газов для каждого участка.
3. Сумма результатов для каждого раздела.

Стандарт учитывает не только производимые вторичные выбросы и энергию, потребляемую при сгорании топлива (преобразование энергии из топлива в механическую энергию), но также первичные выбросы, возникающие при добыче, производстве и распределении:

- e_w – энергетический коэффициент «well-to-wheels» для определенного топлива;
- g_w – коэффициент выбросов «well-to-wheels» для определенного топлива;
- e_t – энергетический коэффициент «tank-to-wheels» для определенного топлива;
- g_t – коэффициент выбросов «tank-to-wheels» для определенного топлива.

Фактор полного сопротивления охватывает также первичные и вторичные выбросы и потребление.

Иногда этот фактор также называется анализом / оценкой жизненного цикла. Коэффициент «tank-to-wheels» учитывает только вторичные выбросы и потребление. Этот стандарт определяет общую методологию расчета. Заявленное значение для энергетического фактора и коэффициента выбросов парниковых газов должно быть выбрано соответствующим образом [11, 12].

Эмиссионные газы состоят из нескольких отдельных компонентов (газов). Каждый из них имеет разные химические и физические свойства и, следовательно, по-разному участвует в деградации окружающей среды. Для того чтобы сравнивать выбросы от различных видов деятельности, видов топлива, транспортных средств, когда выбросы имеют разные следы, необходимо указать одну репрезентативную единицу, пригодную для сравнения. Это эквивалент CO_2 (CO_{2e}), который является мерой воздействия конкретных выбросов и сравнивает его с воздействием CO_2 [13, 14].

Методика расчета

Программное обеспечение «Железнодорожная динамика» использовалось для расчета энергопотребления поезда. Потребляемая мощность поезда была рассчитана на основе предварительно определенных и выбранных значений на установленном маршруте.

Программное обеспечение работает с импортированными картами и профилем высот железнодорожных маршрутов. На основании этих значений по умолчанию и выбранных параметров (тип локомотива, масса и длина поезда, нагрузка на ось, количество и расположение остановок) было рассчитано энергопотребление в кВт·ч.

Это программное обеспечение может использоваться с целью расчета потребления энергии и времени эксплуатации или времени движения какого-либо произвольного поезда на любом произвольном железнодорожном пути. Для расчета необходимо импортировать данные поезда и пути [15]. Для соответствующего сравнения результатов для разных видов потребляемой энергии необходимо использовать принцип «well-to-wheels». Расчетная энергия это – механическая работа, необходимая для движения автомобиля. Если он преобразован в единицы MJ, он может быть впоследствии преобразован в общую потребленную энергию. Это означает, что в соответствии с принципом «well-to-wheels» используются коэффициенты e_w , g_w (EN 16 258:2012) или общая энергоэффективность η_{TE} [16].

Для вычисления потребления транспортных средств, оснащенных двигателями внутреннего сгорания, используется следующее уравнение:

$$E_{TF} = FC_V \cdot e_w = \left[(E_{ME} \cdot m_{pe}) \cdot \frac{1}{\rho F} \right] \cdot e_w, \quad (1)$$

где E_{TF} – общая энергия, потребляемая дизельными автомобилями [MJ]; FC_V – расход топлива транспортного средства [л, dm^3]; E_{ME} – механическая энергия, потребляемая движением поезда (результат программного обеспечения динамики поезда) [кВт·ч]; m_{pe} – удельный расход топлива двигателя автомобиля [г/кВт·ч]; ρF – удельный вес (плотность) топлива (дизель) [г/ dm^3]; e_w – энергетический фактор [MJ/ dm^3].

Для расчета производства парниковых газов потребляемое количество дизельного топлива должно быть умножено на коэффициент выбросов для этого топлива из Приложения А стандарта EN:

$$G_{TF} = FC_V \cdot g_w = \left[(E_{ME} \cdot m_{pe}) \cdot \frac{1}{\rho F} \right] \cdot g_w, \quad (2)$$

где G_{TF} – общий объем производимых выбросов дизельными поездами [гCO_{2e}]; g_w – коэффициент выбросов для определенного топлива [тCO_{2e}/MWh].

Для расчета были выбраны базовые единицы MJ и гCO₂, поскольку они являются единицами,

заявленными в стандарте. Для лучшего сравнения можно выразить отдельные количества в других единицах, например, GJ, kJ, тCO₂, кгCO_{2e} или их комбинации, в случае пропорционального выражения величин [17].

Железнодорожный транспорт

В данном примере мы рассмотрим транспорт по одному из выбранных в Азербайджанской Республике от столицы Баку до Сумгаита. Общее расстояние между двумя городами составляет 30 км. Расчет для этого модельного исследования был сделан на трассе двунаправленным образом: один путь вниз по склону, а другой – вверх. Эта высота видна в потреблении энергии, которое выше для гористой трассы – от Баку до Сумгаита.

Только числа, полученные в результате переноса в обоих направлениях, находятся в оценочной таблице и на графике. Моделирование энергопотребления проводилось для железнодорожного транспорта, используемого в Азербайджанской Республике на региональном пассажирском транспорте. Это дизельное двухсекционное железнодорожное транспортное средство с серийным номером 813-913. Оно приводится в движение дизельным двигателем внутреннего сгорания MAN D 2876 LUE 21 с выходной мощностью 257 кВт. Вес тары 39 т, вес брутто 53 т. Пассажировместимость составляет 83 места.

Расчетная энергия – механическая работа, необходимая для движения поезда. После преобразования этой энергии в единицы MJ, она впоследствии преобразуется в общую потребляемую энергию по общей энергетической эффективности:

$$E_T = (E_{ME} \cdot 3,6) \cdot \eta_{CE}, \quad (3)$$

где E_T – суммарная энергия, потребляемая электрической тягой (MJ); E_{ME} – механическая энергия, потребляемая движением поезда (результат программного обеспечения динамики поезда) (кВт·ч).

Потребляемая энергия поезда рассчитывается делением механической работы и эффективности транспортного средства [18]:

$$G_T = [(E_{ME} \cdot \eta_{VS}) \cdot 1000] \cdot f_{LCA}, \quad (4)$$

$$E_T = [(E_{ME} / \eta_{CE}) \cdot 3,6] \cdot f_{LCA}^g, \quad (5)$$

где G_T – общий объем выбросов, производимых электрической тягой [гCO_{2e}]; f_{LCA} – коэффициент выбросов для электрической энергии [тCO_{2e}/MWh]; f_{LCA}^g – коэффициент выбросов для электрической энергии [гCO_{2e}/MJ].

Автомобильный транспорт

Для использования методологии расчета энергоемкости и производства парниковых газов на транспорте для легковых автомобилей с различными

типами топлива целесообразно использовать следующий пример. Рассмотрим транспортное средство, часто используемое в Азербайджане, которое представляет собой автомобиль среднего класса неназванного производителя. Этот тип транспортного средства с двумя типами движения – бензин и дизель с примерно одинаковой мощностью двигателя.

Марка и модель автомобиля в данном случае не важны, но рабочие характеристики, весовые параметры и расход топлива имеют значение. Масса в снаряженном состоянии составляет около 1 500 кг, а мощность двигателя – около 80 кВт. Для данного типа транспортного средства расход топлива может составлять от 6 до 7 л бензина на 100 км; в случае дизельных двигателей он может составлять от 5 до 6 л на 100 км [6]. Расходы топлива и энергии, указанные производителем, были использованы для целей данного расчета. Расход измеряли в соответствии со стандартом. Потребление энергии и производство парниковых газов с глобальной точки зрения имеет важное значение, поэтому первичные, а также вторичные воздействия принимаются во внимание [10].

Для того чтобы рассчитать общее энергопотребление автомобильного транспорта, количество потребляемого топлива дорожным транспортным средством должно быть умножено на энергетический коэффициент для этого топлива из Приложения А [7] к стандарту:

$$E_{TV} = [(FC_{km} \cdot L)/100] \cdot e_w, \quad (6)$$

где E_{TV} – общая энергия, потребляемая транспортными средствами (MJ); FC_{km} – расход топлива (л/100 км); L – пройденное расстояние (км); e_w – энергетический коэффициент «well to wheels» для опреде-

ленного топлива (MJ/l).

Для того чтобы рассчитать общий объем производства парниковых газов, потребляемое количество топлива следует умножить на коэффициент выбросов для этого топлива из Приложения А [7] к стандарту:

$$G_{TV} = [(FC_{km} \cdot L)/100] \cdot g_w, \quad (7)$$

где G_{TV} – общий объем выбросов, производимых транспортными средствами (gCO_2e); g_w – коэффициент выбросов для определенного топлива (tCO_2e/MJ).

Результаты и выводы

Результаты расчетов приведены в табл. и на рис.

Смоделированный расход топлива дизель-поезда сравнивался с реальным расходом этого поезда, работающего на этой трассе. Смоделированный результат был подтвержден, потому что ошибка симуляции была только 8 %. Таким образом, каждый результат потребления увеличен на величину 8 %, чтобы быть ближе к реальности.

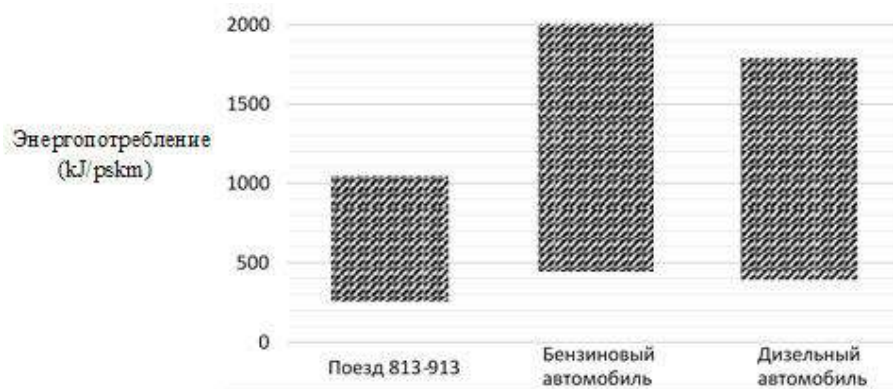
Результаты, приведенные в табл., описывают наиболее интенсивное энергопотребление автомобиля – бензиновый легковой автомобиль.

Потребление энергии и производство парниковых газов на 10 % выше, чем у дизельного автомобиля во всем спектре загруженности автомобилей. Общественный транспорт экологичнее индивидуального. Энергоемкость и производство парниковых газов в дизельном поезде ниже, несмотря на высокую массу тары в поезде, что достигается благодаря большому количеству пассажиров.

Энергоемкость бензинового автомобиля на

Итоговая оценка результатов
Final evaluation of results

Параметры	Тип тяги		
	Рельсовый	Дорожный	
(Номер транспортного средства, наименование тяги)	Поезд 813-913	Бензин	Дизель
Заполняемость (%)	20–100	20–100	20–100
Энергопотребление (kJ/pskm)	256–1 045	443–2 011	395–1 789
Производство парниковых газов (g/pskm)	19,4–79,3	34–153,6	29,9–135,8



Графическое оформление результатов расчетов
Graphic design of calculation results

70 % выше, а дизельного автомобиля на 50 % выше по сравнению с железнодорожным транспортным средством. Тот же сценарий связан с производством парниковых газов. Он действителен для полной загрузки транспортных средств. Разница (энергия и парниковый газ) увеличивается между автомобильным и железнодорожным транспортом с уменьшением загруженности транспортных средств. Разница в бензиновом автомобиле на 90 % выше воздействия на окружающую среду и 70 % в дизельном автомобиле при 20 % заполнения.

Результаты этого моделирования не определяют, какая тяга экологичнее или безопаснее для окружающей среды Азербайджана. Это невозможно сделать, так как эффективность использования энергии и производство парниковых газов зависят не только от типа топлива, но и от загруженности. Необходимо загружать поезда достаточным количеством пассажиров (подходящий выбор поезда в зависимости от транспортного потока). Эффективность транспортных средств уменьшается с сокращением фактической загруженности автомобиля. Результаты показывают, что «незеленые транспортные средства» – могут быть очень эффективными в плане потребления энергии и производства парниковых газов в Азербайджане.

Иногда они могут быть более эффективными, чем общественный транспорт, но только при более высокой загруженности. Смысл этого результата в

том, что использование пропускной способности транспортного средства очень важно при оценке и сравнении разных видов транспорта или разных транспортных средств с точки зрения их воздействия на окружающую среду.

Использование мощностей зависит от спроса потенциальных пассажиров, транспортной инфраструктуры и предложения услуг общественного транспорта в городах Азербайджанской Республики. Нелегко сказать, какой вид транспорта или транспортное средство лучше использовать из-за многих факторов. Для того чтобы сделать перевозку товаров устойчивой, важно использовать большинство видов транспорта, которые с точки зрения энергопотребления и производства парниковых газов являются наиболее благоприятными для окружающей среды. Энергоемкость и выбросы парниковых газов на транспорте зависят от имеющейся транспортной инфраструктуры, выбора подходящих транспортных средств, количества и характера перевозимых грузов и тяги или используемого топлива.

Потребление первичной, а также вторичной энергии должно учитываться при оценке энергоемкости и производства парниковых газов. Важным фактором, который часто забывают, является то, что даже электрическая тяга может оказать значительное негативное воздействие на окружающую среду, если основные источники ее производства – ископаемые виды топлива.

Список литературы

1. Зволенский П., Стучли В., Гренчик Дж., Попроцкий Р. Эволюция систем технического обслуживания пассажирских и грузовых вагонов с точки зрения сертификации ЕСМ // Связь: Научные письма Жилинского университета. 2014. Вып.16, № 3А. С. 40–47.
2. Бартоломейчик М., Мирчевский С. Сокращение энергопотребления в общественном транспорте – результаты экспериментальной эксплуатации энергоблока суперконденсаторов энергии в троллейбусной системе Гдыня. 16-я Международная конференция и выставка силовой электроники и управления движением, Университет Гази, Силовое электронное управление двигателем, технология Bridge. 2014.
3. Бартоломейчик М., Полом М. Многофакторный анализ измерений восстановления энергии разрушения // Преобразование энергии и управление. 2016. Вып. 127. С. 35–42.
4. Кабан Дж., Дроздзей П., Барта Д., Лискак С. Системы контроля давления в шинах транспортных средств // Диагностика. Вып.15. № 3. С. 11–14.
5. Давила А. Отчет о расходе топлива. Проект 233683 САРТРЕ, ЕЭК. 2013.
6. Долинаева А. Факторы и детерминанты модального расщепления в пассажирском транспорте // Горизонты железнодорожного транспорта. Научные труды. 2011. Вып. 2. № 1. С. 33–39.
7. Европейский стандарт EN 16 258: 2012. Методология расчета и декларации потребления энергии и выбросов парниковых газов транспортными услугами (грузовые и пассажирские перевозки). 2012.
8. Рагимов Э.А. Экологические особенности транспорта // Теоретическая и прикладная наука. 2019. 07 (75). С. 284–288. DOI: <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2019.07.75.46>.
9. Калина К., Юркович М., Гробарчикова А. СПГ – большие возможности для внутреннего водного транспорта. Учеб. 19-го интерна // Научная конференция: Транспортные средства, 22–23 октября 2015, Каунасский технологический университет. С. 489–492.
10. Клинка М., Гренчик Дж. Транспортные средства с опрокидывающимся кузовом на словацких железных дорогах - возможности использования и параметры, которые следует учитывать // Связь: Научные письма из Университета Жилины. 2008. Вып.10, № 3. С. 45–49.
11. Кнез М., Джереб Б., Обрехт М. Факторы, влияющие на решения о покупке автомобилей с низким уровнем выбросов: исследование Словении. Исследования в области транспорта, Часть D // Транспорт и окружающая среда. 2014. Вып. 30. С. 53–61.
12. Кнез М., Мьюнер Т., Джереб Б., Куллинан К. Оценка цикла вождения для Цэлье и сравнение с другими европейскими городами // Устойчивые города и общества. 2014. Вып. 1. С. 6–60.

13. Кучера Л., Гайдац И., Мрузек М. Моделирование параметров, влияющих на радиус действия электромобиля // Связь: Научные письма Университета Жилина. 2016. Вып. 8, № 1А. С. 9–63.
14. Скручаны Т., Гнап Дж. Энергоемкость и производство парниковых газов автомобильным и железнодорожным транспортом. Грузовые перевозки с использованием программного обеспечения для моделирования энергопотребления поезда. Телематика – поддержка транспорта: 14-я международная конференция по телематике транспортных систем, ТСТ, Берлин, 2014: Спрингер-Верлаг. С. 263–272.
15. Скручаны Т. Программное моделирование энергопотребления и производства парниковых газов на транспорте // Связь в области компьютерных и информационных наук. 2015. Вып. 531. С. 151–160.
16. Симкова И., Конечный В., Капуста Ю. Определение критериев грузовых автомобильных перевозок // Логи: Научный журнал по транспорту и логистике. 2015. № 1. С. 20–129.
17. Саркан Б., Холеса Л., Кабан Дж. Измерение расхода топлива дорожное транспортное средство путем тестирования вождения на открытом воздухе // Достижения в области науки и техники. Журнал исследований. 2013. Вып. 7. № 19. С. 70–74.
18. Рагимов Э.А. Перспективы автоматизированных автомобилей для снижения транспортной энергии // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 11. С. 11–16. DOI: <https://dx.doi.org/10.25791/pribor.11.2019.1001>.

References

1. Zvolensky P., Stuchly V., Grecik J., Poprocky R. Evolyutsiya sistem tekhnicheskogo obsluzhivaniya passazhirskikh i gruzovykh vagonov s točki zreniya sertifikatsii ECM [Evolution of maintenance systems of passenger and freight wagons from the ECM certification point of view]. *Svyaz': Nauchnyye pis'ma Zhilinskogo universiteta [Communications: Scientific letters of the University of Zilina]*, 2014, Vol. 16, No. 3A, pp.40–47.
2. Bartłomiejczyk M., Mirchevski S. Sokrashcheniye energopotrebleniya v obshchestvennom transporte – rezul'taty eksperimental'noy ekspluatatsii energobloka superkondensatorov energii v trolleybusnoy sisteme Gdynya [Reducing of energy consumption in public transport - results of experimental exploitation of supercapacitor energy bank in Gdynia trolleybus system]. *16-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya i vystavka silovoy elektroniki i upravleniya dvizheniyem, Universitet Gazi, Silovoye elektronnoye upravleniye dvigatelem, tekhnologiya Bridge [16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), Gazi Univ.; Power Elect Mot Control E W Technol Bridge]*, 2014.
3. Bartłomiejczyk M., Polom M. Mnogofaktornyy analiz izmereniy vosstanovleniya energii razrusheniya [Multiaspect measurement analysis of breaking energy recovery]. *Preobrazovaniye energii i upravleniye [Energy conversion and management]*, 2016, Vol. 127, pp. 35–42.
4. Caban J., Drozdziel P., Barta D., Liscak S. Sistemy kontrolya davleniya v shinakh transportnykh sredstv [Vehicle Tire Pressure Monitoring Systems]. *Diagnostika [Diagnostics]*, 2014, Vol. 15, No. 3, pp. 11–14.
5. Davila A. Otchet o raskhode topliva. Projekt 233683 SARTRE, ECE [Report on Fuel Consumption. Project 233683 SARTRE, ECE], 2013.
6. Dolinayova A. Faktory i determinanty modal'nogo rasshepleniya v passazhirskom transporte [Factors and determinants of modal split in passenger transport]. *Gorizonty zheleznodorozhnogo transporta. Nauchnyye trudy [Horizons of railway transport. Scientific papers]*, 2011, Vol. 2, No. 1, pp. 33–39.
7. European standard EN 16 258:2012. (2012) Metodologiya rascheta i deklaratsii potrebleniya energii i vybrosov parnikovyykh gazov transportnymi uslugami (gruzovyie i passazhirskiy perevozki) [Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers)].
8. Rahimov E.A. Ekologicheskiye osobennosti transporta [Ecological features of transport]. *Teoreticheskaya i prikladnaya nauka [ISJ Theoretical & Applied Science]*, 2019, Vol. 07(75), pp. 284–288. DOI: <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2019.07.75.46>.
9. Kalina K., Jurkovic M., Grobarcikova A. SPG – bol'shiye vozmozhnosti dlya vnutrennego vodnogo transporta. Ucheb. 19-go interna [LNG – Great Opportunity for the Inland Water Transport. Proc. of the 19th intern]. *Nauchnaya konferentsiya: Transportnyye sredstva, 22–23 oktyabrya 2015, Kaunasskiy tekhnologicheskii universitet [Scientific conference: Transport Means, October 22–23, Kaunas University of Technology]*, 2015, pp. 489–492.
10. Klinko M., Grecik J. Transportnyye sredstva s oprokidyvayushchimsya kuzovom na slovatskikh zheleznykh dorogakh - vozmozhnosti ispol'zovaniya i parametry, kotorye sleduyet uchityvat' [Tilting body vehicles on Slovak railways - potential for use and parameters to be considered]. *Svyaz': Nauchnyye pis'ma iz Universiteta Zhiliny [Communications: Scientific letters of the University of Zilina]*, 2008, Vol. 10, No. 3, pp. 45–49.
11. Knez M., Jereb B., Obrecht M. Faktory, vliyayushchiye na resheniya o pokupke avtomobiley s nizkim urovnem vybrosov: issledovaniye Slovenii. Issledovaniya v oblasti transporta, Chast' D [Factors Influencing the Purchasing Decisions of Low Emission Cars: A Study of Slovenia. Transportation Research, Part D]. *Transport i okruzhayushchaya sreda [Transport and Environment]*, 2014, Vol. 30, pp. 53–61.
12. Knez M., Muneer T., Jereb B., Cullinane K. Otsenka tsikla vozhdeniya dlya Tsel'ye i sravneniye s drugimi yevropeyskimi gorodami [The Estimation of a Driving Cycle for Celje and a Comparison to other European Cities]. *Ustoychivye goroda i obshchestva [Sustainable Cities and Society]*, 2014, Vol. 11, pp. 56–60.
13. Kucera L., Gajdac I., Mruzek M. Modelirovaniye parametrov, vliyayushchikh na radius deystviya elektromobilya [Simulation of Parameters Influencing the Electric Vehicle Range]. *Svyaz': Nauchnyye pis'ma Universiteta Zhilina [Communications: Scientific Letters of the University of Zilina]*, 2016, Vol. 18, No. 1A, pp. 59–63.
14. Skrucany T., Gnap J. Energoyemkost' i proizvodstvo parnikovyykh gazov avtomobil'nyim i zheleznodorozhnym transportom. Gruzovyie perevozki s ispol'zovaniyem programmnogo obespecheniya dlya modelirovaniya energopotrebleniya

poyezda [Energy intensity and greenhouse gases production of the road and rail Cargo transport using a software in simulate the energy consumption of a train]. *Telematika – podderzhka transporta: 14-ya mezhdunarodnaya konferentsiya po telematike transportnykh sistem, TST [Telematics - support of transport. 14th international conference on Transport systems telematics, TST]*. Berlin: SPRINGER-VERLAG, 2014, pp. 263–272.

15. Skrucany T. Programmnoye modelirovaniye energopotrebleniya i proizvodstva parnikovyykh gazov na transporte [Software Simulation of an Energy Consumption and GHG production in Transport]. *Svyaz' v oblasti komp'yuternykh i informatsionnykh nauk [Communications in Computer and Information Science]*, 2015, Vol. 531, pp. 151–160.

16. Simkova I., Konechny V., Kapusta J. Opredeleniye kriteriyev gruzovykh avtomobil'nykh perevozok [The definition of the freight road transport criteria]. *Logi: Nauchnyy zhurnal po transportu i logistike [Logi: Scientific Journal on Transport and Logistics]*, 2015, Vol. 6, No. 1, pp. 120–129.

17. Sarkan B., Holesa L., Caban J. Izmereniye raskhoda topliva dorozhnoye transportnoye sredstvo putem testirovaniya vozhdeniya na otkrytom vozdukh [Measurement of fuel consumption of road motor vehicle by outdoor driving testing]. *Dostizheniya v oblasti nauki i tekhniki. Zhurnal issledovaniy [Advances in science and technology. Journal Research]*, 2013, Vol. 7, No. 19, pp. 70–74.

18. Rahimov E.A. Perspektivy avtomatizirovannykh avtomobiley dlya snizheniya transportnoy energii [Prospects for automated cars to decrease transportation energy]. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika [Instruments and Systems. Monitoring, Control, and Diagnostics]*, 2019, No. 11, pp. 11–16. DOI: <https://dx.doi.org/10.25791/pribor.11.2019.1001>.

Информация об авторах

Рагимов Эльмар Агагагим оглы – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Института Географии им. акад. Г. Алиева Национальной академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджан, e-mail: elmar_rahimov@yahoo.com

Information about the authors

Elmar A. Rahimov – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the Institute of Geography named after acad. H. Aliyev, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan, e-mail: elmar_rahimov@yahoo.com

Оптимизация работы железнодорожных станций в условиях внедрения современных систем интервального регулирования движения поездов на восточном полигоне

В. А. Оленцевич¹✉, А. А. Оленцевич², В. Е. Гозбенко^{1,3}

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

²Beijing Institute of Technology, Beijing, China

³Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

✉ olencevich_va@mail.ru

Резюме

Наиболее значимым научным направлением развития сектора организации перевозочного процесса ОАО «Российские железные дороги», является внедрение систем интервального регулирования движения поездов без светофоров с применением спутниковой навигации и цифрового радиоканала. Это также соответствует Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. Наращивание объемов пропускной способности объектов транспортной инфраструктуры Восточного полигона, повышение уровня безопасности движения возможно за счет оптимизации перевозочного процесса на основе составления новых перспективных схем распределения вагонопотоков в условиях неравномерности грузонапряженности направлений, а также совершенствования методов и алгоритмов управления в системах интервального регулирования движения поездов. Актуальность научной статьи заключается в том, что проблема нехватки пропускной способности объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры носит комплексный характер. Высокий уровень интенсивности движения, отсутствие резервов для пропуска поездов, технические и организационные нарушения в работе, возникшие в одном месте, автоматически приводят к появлению и увеличению показателей непроизводительного простоя подвижного состава по всему Восточному полигону. Дефицит наличной пропускной способности горноперевального участка Восточного полигона к 2023 г. составит 20 пар грузовых поездов. Проблемы и перспективы организации работы данного железнодорожного участка в условиях внедрения современных систем интервального регулирования движения поездов, определение направлений усовершенствования технологии работы наиболее значимых для организации перевозочного процесса железнодорожных станций являются целью данной статьи.

Ключевые слова

Восточный полигон, система интервального регулирования, пропускная способность, микропроцессорная автоблокировка, подвижной блок-участок, суточный план-график работы, грузонапряженность направлений

Для цитирования

Оленцевич В. А. Оптимизация работы железнодорожных станций на участке железнодорожной линии в условиях внедрения современных систем интервального регулирования движения поездов / В. А. Оленцевич, А. А. Оленцевич, В. Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 149–157. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).149-157

Информация о статье

поступила в редакцию: 12.10.2021, поступила после рецензирования: 20.10.2021, принята к публикации: 24.10.2021

Optimization of railway stations operation in the context of the introduction of modern systems of train traffic interval regulation at the eastern polygon

V. A. Olencevich¹✉, A. A. Olentcevich², V. E. Gozbenko^{1,3}

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Beijing Institute of Technology, Beijing, China

³Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

✉ olencevich_va@mail.ru

Abstract

The most significant scientific direction of the development of the "Organization of the transportation process" sector of JSC "Russian Railways", as well as in accordance with the Strategy for the Development of railway Transport in the Russian Federation until 2030 is the introduction of interval control systems for trains without traffic lights using satellite navigation and digital radio channel. Increasing the capacity of the transport infrastructure facilities of the Eastern Polygon, increasing the level of traffic safety, is possible due to the optimization of the transportation process on the basis of drawing up new promising schemes for

the distribution of car traffic in conditions of uneven load-bearing directions, as well as improving management methods and algorithms in systems of interval regulation of train traffic. The relevance of the scientific article lies in the fact that the problem of lack of capacity of railway transport infrastructure facilities is complex. The high traffic intensity level, the lack of reserves for trains passing, technical and organizational disruptions that have arisen in one place automatically lead to the appearance and increase in indicators of unproductive downtime of rolling stock throughout the Eastern polygon. The shortage of available capacity in the mining and processing section of the Eastern Landfill will amount to 20 pairs of freight trains by 2023. The problems and prospects of work organization on this railway section under the conditions of the introduction of modern systems of train traffic interval regulation, setting up directions for improving the technology of operation of the railway stations most significant for the organization of the transportation process make up the purpose of this article.

Keywords

Eastern polygon, interval control system, throughput, microprocessor-based auto-locking, visual block section, daily work schedule, loadbearing directions

For citation

Olenkevich V. A., Olenkevich A. A., Gozbenko V. E. Optimizatsiya raboty zheleznodorozhnykh stantsii na uchastke zheleznodorozhnoi linii v usloviyakh vnedreniya sovremennykh sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Optimization of railway stations operation in the context of the introduction of modern systems of train traffic interval regulation at the eastern polygon]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 149–157. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).149-157

Article Info

Received: 12.10.2021, Revised: 20.10.2021, Accepted: 24.10.2021

Введение

В рамках реализации цифровых проектов в ОАО «РЖД», основная задача которых – повышение качества предоставляемых транспортных и логистических услуг, широкое применение получили технологии цифровизации перевозочного процесса, в основе которых заложено цифровое моделирование, создание цифровых двойников большинства перспективных объектов и направлений по развитию предприятий отрасли. Активное развитие получил локомотивный комплекс на основе распределенных реестров «доверенная среда», в сфере вагонного парка рецензирование жизненного цикла отдельных частей и деталей грузового вагонного парка, для оптимизации грузовых перевозок внедряются смарт-контракты. Все это позволяет отрасли повысить уровень конкурентоспособности на рынке транспортных услуг, расширить перечень новых услуг, оптимизировать и модернизировать имеющиеся управленческие и технические подходы к организации перевозочного процесса на более эффективном уровне.

Программа развития компания ОАО «РЖД» в сфере информационных технологий на период до 2025 г. является основополагающим документом, увязывающим развитие IT-инфраструктуры и проекты Стратегии цифровой трансформации, служит технологическим фундаментом, способствующим внедрению прорывных цифровых технологий, цифрового покрытия сквозных перевозочных процессов и систематизации процессов управления данными [1, 2].

На основании [1–5] наиболее значимым научным направлением развития сектора организации перевозочного процесса ОАО «РЖД» является

внедрение систем интервального регулирования движения поездов без светофоров с применением спутниковой навигации и цифрового радиоканала [3]. Это также соответствует распоряжению Правительства Российской Федерации «О стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.» от 17 июня 2008 г. № 877-р.

Интеллектуализация и цифровизация перевозочного процесса на Восточном полигоне

Прирост объемов международных железнодорожных контейнерных перевозок является одной из главных задач развития Восточного полигона. Полигон выполняет функции по регулированию потребностей в тяговом подвижном составе, количестве вагонного парка, объемов и сроков проведения плановых видов ремонтов, обновлению и информатизации инфраструктуры объектов и железнодорожных линий, а также прочих видов деятельности, способствующих эффективному, бесперебойному функционированию. Все это способствует в значительной мере повышению уровня качественных показателей работы ОАО «РЖД».

Именно деятельность Восточного полигона российских железных дорог служит фундаментом эффективной работы Трансевразийских коридоров. Входящие в его состав транспортные магистрали решают ключевые для экономики РФ задачи:

- перевозку грузов из западных регионов страны и с месторождений Урала и Сибири в сторону портов Дальнего Востока и далее морем к растущим рынкам Азиатско-Тихоокеанского региона;
- отправку грузов через железнодорожные сухопутные переходы Дальнего Востока, в частности

сти через южный Транссиб и станцию Забайкальск к промышленным центрам и портам Китая;

– по транзитному маршруту отправку грузов через территорию Монголии.

Согласно плановым значениям работы Восточного полигона в 2024 г. пропуск в восточном направлении должен достичь 180 млн т грузов при имеющихся 144 млн [1–5], только при условии внедрения нескольких видов систем интервального регулирования движения поездов.

Процессы интеллектуализации и цифровизации перевозочного процесса должны быть присущи следующим основным направлениям деятельности полигона: технические средства инфраструктуры, организация перевозок грузов и пассажиров, работа подвижного состава.

Система интервального регулирования движения поездов (СИРДП), сегодня одна из эффективных технологий в ОАО «РЖД» при организации движения поездов, обеспечивающая наименьший интервал по условиям высокого уровня безопасности движения на Восточном полигоне. Кроме того, она позволяет реализовать основной принцип оптимального решения вопросов прироста пропускной способности и повышения необходимого уровня безопасности движения на восточном направлении в рамках прироста объемов работы [6–8].

Реализация СИРДП с минимальным межпоездным интервалом возможна при внедрении следующих технологий:

1. Повышение скорости поезда при движении на сигнал светофора «желтый» – технология предполагает повышение допустимой скорости проследования светофора с желтым огнем более 60 км/ч за счет применения устройств безопасности, обеспечивающих расчет тормозной кривой к светофору с запрещающим показанием.

2. «Виртуальная сцепка» (ВСЦ) – это соединение локомотивов последовательно следующих поездов по радиоканалу, по схеме «ведущий» – «ведомый». Согласно данной схеме, осуществляется ведение последующего грузового поезда, который является при этом «ведомым» и при движении использует информацию, источником которой является первый поезд, т. е. «ведущий».

В схеме «ведущий» – «ведомый» управление тяговым транспортным средством может производиться в режиме автоведения, либо в ручном режиме машинистом. Для расчета режима ведения ведомого поезда используется информация о скорости и показаниях локомотивного светофора ведущего поезда:

3. Развитие технологии ВСЦ, когда вопрос неустойчивости радиосвязи в режиме «точка – точка» снимается за счет использования цифровой системы технологической радиосвязи стандарта DMR. Данная технология предусматривает технологию движения подвижных единиц последовательно один

за другим, а также присутствие между ними (обеспечивающейся через центр управления радиосредствами) постоянно действующей системы связи.

4. Технология интервального регулирования с подвижными блок-участками обеспечивает максимальную пропускную способность железнодорожной инфраструктуры.

Представленные технологии могут применяться как самостоятельные средства для повышения пропускной способности на лимитирующих участках железных дорог, так и в различных комбинациях [9–12].

Рассмотрим суть представленных технологий, а также их положительные и отрицательные стороны применительно к работе Восточного полигона, среди возможных методов оптимизации работы которого сегодня наиболее актуальными являются:

– разработка новых конструкций инновационного вагонного парка имеющего повышенную степень грузоподъемности;

– минимизация количества подвижного состава порожнего состояния при его возврате;

– наращивание длины грузовых поездов;

– широкое применение высокотехнологичных средств ВСЦ (рис. 1).

Во многих странах мира успешно применяются СИРДП на основе радиоканала. Наибольшее применение подобные системы нашли в Европейских странах, Японии, США. В соответствии с [13–15] ERTMS ATLAS с 2012 г. в Европе и Азии работают системы интервального регулирования движения поездов на основе радиоканала на линиях длиной более 4 тыс. км. Приблизительно такое же количество строится. Данные системы основаны на передаче информации по цифровому радиоканалу между стационарным и бортовым оборудованием.

Наиболее перспективным вариантом на сегодняшний день среди развитых технологий является вариант комбинирования действующих традиционных систем управления движения поездов с СИРДП на базе автоматической автоблокировки с рельсовыми цепями или со счетчиками осей, а также использование гибридных технологий – модификаций европейской системы управления ETCS.

С 2020 г. на одном из участков железнодорожной линии Восточного полигона ведется внедрение современной СИРДП АБТЦ-МШ. Применение данных технологий приведет к сокращению интервала движения поездов до 5–6 мин. при имеющихся 8–9 мин. Система предусматривает переход на бессветофорную систему. С этой целью необходимая техника и оборудование микропроцессорной централизации размещены на железнодорожных станциях пилотной линии, что позволяет весь объем информации о текущей поездной обстановке передавать напрямую в кабину машиниста локомотива, который при управлении руководствуется не существующими показаниями назем-

ных светофоров, а длиной участка до впереди идущего состава.

Эффективность внедряемой на рассматриваемом участке интеллектуальной системы интервального регулирования на базе бесветофорной технологии представлена на рис. 2.

Оптимизация работы железнодорожных станций в условиях внедрения современных систем интервального регулирования движения поездов на Восточном полигоне

На Восточном полигоне железных дорог происходит плановая реализация мероприятий реконструктивного характера – использование инноваци-

онных тяговых ресурсов, унифицированного вагонного парка, увеличение количества железнодорожных путей, автоматизация и информатизация перевозочных операций. Данные преобразования предъявляют повышенные требования к функционированию всех структурных подразделений полигона. Внедрение нового высокотехнологического оснащения и совершенствование существующих технологий работы должно обеспечивать такое соотношение между объемом переработки грузов и существующими основными фондами железнодорожных станций и узлов, и ее техническими резервами, чтобы обеспечивался потенциал снижения затрат на приработку одной тонны груза. Эффективного ре-

Наименование характеристики	Система АБТЦ-МШ
Возможность обращения всех типов подвижного состава с уменьшенным интервалом	Да (включая локомотивы с релейным дешифратором ДКСВ)
Исключение напольных светофоров	Да (применяется специальный индикатор выключенного светофора)
Применение рельсовых цепей	Да (тональные рельсовые цепи)
Отсутствие дополнительных путевых датчиков	Да (движение по данным электронной карты)
Использование локомотивной сигнализации	Да
Применение средств цифрового радиоканала (Р/К)	Да (возможно использование в качестве дополнительного канала передачи данных)
Использование цифрового Р/К для подтверждения наличия и исправности бортовых устройств безопасности	Да (реализовано на участке Электросталь – Ногинск Московской ж.д.)
Постоянные ограничения скорости	Да (по данным электронной карты)
Проследование зон неисправности	Да (со скоростью не более 50 км/ч по команде оператора)

Рис. 1. Преимущества системы АБТЦ-МШ с подвижными блок-участками

Fig. 1. Advantages of ФБТЦ-МШ system with mobile block-sites



Рис. 2. Эффективность интеллектуальной системы интервального регулирования движения поездов на базе бесветофорной технологии

Fig. 2. Efficiency of intellectual train traffic interval regulation system based on traffic light free technology

шения указанной задачи можно достичь только при учете реальных условий работы железнодорожной станции, т. е. при функционировании станционных устройств в режиме неравномерной загрузки, принимая при расчете величины потребной пропускной способности элементов инфраструктуры ее максимальное значение. Причин неравномерности организации движения поездов достаточно много, при этом для горноперевальных участков Восточного полигона основными являются сосредоточенный пропуск пригородных и пассажирских поездов, предоставление «окон» для ремонта путевых устройств, контактной сети и других элементов инфраструктуры, независимость движения на участках, примыкающих к железнодорожным станциям и т. д. [16, 17]

В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации «О стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.» от 17 июня 2008 г. № 877-р, нехватка уровня наличной пропускной способности на наиболее сложном участке Восточного полигона между станциями $I_1 - U_1$ к 2023 г. составит 20 пар грузовых поездов. Проблемы и перспективы организации работы указанного железнодорожного участка в условиях внедрения современных систем интервального регулирования движения поездов, определение направлений усовершенствования технологии работы наиболее значимых для организации перевозочного процесса железнодорожных станций B_1, C_1, C_2, U_1 и является целью данного исследования.

Для расчета пропускной способности отдельных технических элементов железнодорожных станций B_1, C_1, C_2, U_1 выделяются определенные блоки железнодорожных путей для поездов обоих направлений движения, в размерах отношения количества нечетных и четных поездов. Определение пропускной способности данных групп производится отдельно, т. е. объединенный парк для расчета условно необходимо разбить на два парка.

Для анализируемого парка станции рассчитываются суммарные затраты времени, затраченные на занятие установленной группы путей операциями с грузовыми поездами, которые определены технологическим процессом работы станции и зависят от величины поездопотока, а также от специализации данных путей. По формуле (1) определяем данное значение:

$$T = \left(n'_{mp1} \cdot t'_{зан1}{}^{mp} + n'_{mp2} \cdot t'_{зан2}{}^{mp} + \dots + n'_{p1} \cdot t'_{зан1}{}^p + n'_{p2} \cdot t'_{зан2}{}^p + \dots + n'_{\phi1} \cdot t'_{зан1}{}^{\phi} + n'_{\phi2} \cdot t'_{зан2}{}^{\phi} + \dots + \sum n'_i \cdot t'_{занi}{}^{mp} \right) \cdot (1 + \rho) \quad (1)$$

где n'_{mp1}, n'_{mp2} и далее – количество транзитных поездов, пропускаемых через парк соответственно с четного и нечетного подходов; $\sum n'_i$ – количество

передач углового потока или местных вагонов и составов поездов, выставляемых из других парков в приемный парк для расформирования на горке, если на расчетный период количества данных передач (составов) зависит от размеров движения; $n'_{\phi1}, n'_{\phi2}$

и т. д. – количество поездов своего формирования всех категорий (кроме сборных и вывозных с работой на участке), отправляемых из парка соответственно на четный и нечетный выходы; $t'_{зан1}{}^{mp}, t'_{зан1}{}^p$ и т. д. – затраты времени на занятие пути выполнением технологических операций с поездами соответствующих категорий и различных подходов; n'_{p1}, n'_{p2} и прочее – величина поступающих в соответствующий парк станции разборочных поездов всех категорий (кроме сборных и вывозных с работой на участке) со всех подходов; $t_{занi}$ – затраты времени на занятие установленной группы путей одним составом), предусмотренное в технологическом процессе. Данное значение определяется расчетным путем по формуле (2):

$$t'_{занi} = t'_{np} + t'_{cm} + t'_{om} \quad (2)$$

где t'_{np} – затраты времени на занятие пути операциями по приему поезда; t'_{cm} – затраты времени на занятие пути выполнением соответствующих операций, предусмотренных технологическим процессом; t'_{om} – затраты времени на занятие пути операциями по оправлению поезда.

По формуле (3) определим значение коэффициента использования имеющейся мощности парка путей по каждой станции:

$$K = \frac{T}{\beta \alpha \cdot 1440m - \sum T'_{nocm}{}^{np}}, \quad (3)$$

где β – коэффициент использования железнодорожных путей парков станции; α – коэффициент, оказывающий влияние на использование путей для передвижения пассажирских, пригородных, а также сборных поездов; m – количество путей в анализируемом парке станции; $\sum T'_{nocm}{}^{np}$ – затраты времени на занятие путей, используемых для движения грузовых поездов всех категорий, выполнением в течение суток прочих постоянных операций, не изменяющихся пропорционально размерам движения и работами по текущему обслуживанию, плановым видам ремонта и снегоуборке.

Имеющаяся мощность путей рассчитываемого парка для различных типов поездов по каждому подходу или выходу – транзитных с подходов четного и нечетного соответственно, – определяется по формулам (4):

$$n_{\text{тр1}} = \frac{n'_{\text{тр1}}}{K}, \quad n_{\text{тр2}} = \frac{n'_{\text{тр2}}}{K} \quad (4)$$

Суммарная имеющаяся мощность парка в грузовых поездах вычисляется по формуле (5):

$$N = n_p + n_{\text{сб.н}} + n_{\text{мп}}, \quad (5)$$

где n_p – количество поездов, прибывающих в расформирование; $n_{\text{мп}}$ – количество поездов транзитных; $n_{\text{сб.н}}$ – количество прибывающих сборных поездов.

Величина пропускной способности горловин станции определяется по максимально загруженным горловинам, где производятся операции по передвижению организованных поездов и с максимальным объемом маневровых операций.

Анализ технологии работы промежуточной станции Б₁ позволил определить необходимость сооружения дополнительных приемо-отправочных путей. С целью оптимизации работы в новых условиях предлагается восстановить для работы два приемо-отправочных пути (№ 4 и 17). Приемо-отправочные пути № 13 и 11 предлагается удлинить до пересечения с путем ТЧМИС. В западной горловине станции предложена установка дополнительных съездов № 104–108, 110–112, 114–116 для создания возможности более комфортного приема и отправления поезда по неправильному пути. Предложена установка съездов № 80–82, 84–86 для маршрута следования локомотивов подталкивания на 10 тупиковый путь [18–21]. Пропускная способность [22] рассматриваемой горловины станции Б₁: по приему нечетных транзитных грузовых поездов – $n = 137 / 0,87 = 150$ поездов; по отправлению четных транзитных грузовых поездов – $n = 162 / 0,87 = 178$ поездов (табл. 1).

Таблица 1. Расчетные значения пропускной способности станции Б₁

Table 1. Calculated values of throughput capacity of station Б₁

Показатель пропускной способности	Значение показателей	
	Текущий график	После реконструкции
Общее время занятия путей, мин.	8 562,01	9 566,8
Коэффициент использования путей	0,89	0,81
Мощность путей, поезд	101/111	169/200
Коэффициент использования горловины	0,91	0,87
Пропускная способность горловины, поезд	99/109	150/178

Экономический эффект от предложенных мероприятий составит 16 067,28 млн руб.

Предложена модернизация станций С₁ и С₂, основанная на строительстве главного третьего пути в восточной горловине станции С₂, благодаря реализации которого в значительной степени будут сокращены локомотиво-часы простоя подталкивающих локомотивов в ожидании отправления, а также будет достигнуто снижение бригадо-часов локомотивных бригад при работе в грузовом движении и получен значительный технико-экономический эффект от уменьшения враждебности маршрутов при приеме и отправлении поездов. Строительство третьего главного пути и его специализация под пропуск нечетных поездов позволит разгрузить стрелочную горловину станции С₁ и повысить пропускную способность до уровня перегонов, а также смена специализации первого главного пути под пропуск толкачей. Протяженность третьего главного пути составит 2,5 км. Также потребуется установка дополнительного съезда 37–39 в восточной горловине станции С₂.

Пропускная способность рассматриваемой горловины: по приему нечетных транзитных грузовых поездов – $n = 137 / 0,8 = 171$ поезд; по отправлению четных транзитных грузовых поездов – $n = 162 / 0,8 = 202$ поезда (табл. 2).

Таблица 2. Расчетные значения пропускной способности станции С₂

Table 2. Calculated values of throughput capacity of station С₂

Показатель пропускной способности	Значение показателей	
	Текущий график	После реконструкции
Общее время занятия путей, мин.	9 767,8	11 454,8
Коэффициент использования путей	0,76	0,89
Мощность путей, поезд	118/130	154/182
Коэффициент использования горловины	0,74	0,8
Пропускная способность горловины, поезд	121/133	171/202

Экономический эффект от предложенных мероприятий составит 16 495,0 млн руб.

Для повышения пропускной способности горловины железнодорожной станции С₁ предложено также установить съезды № 110–112, 114–116, 144–146 и стрелочный перевод № 44. Пропускная способность рассматриваемой горловины: по приему нечетных транзитных грузовых поездов – $n = 137 / 0,79 = 173$ поезда; по отправлению четных транзитных грузовых поездов – $n = 162 / 0,79 = 205$ поездов (табл. 3).

Таблица 3. Расчетные значения пропускной способности станции C_1
Table 3. Calculated values of throughput capacity of station C_1

Показатель пропускной способности	Значение показателей	
	Текущий график	После реконструкции
Общее время занятия путей, мин.	10 354,4	11 732
Коэффициент использования путей	0,69	0,78
Мощность путей, поезд	131/144	207/175
Коэффициент использования горловины	0,97	0,79
Пропускная способность горловины, поезд	92/102	173/205

Экономический эффект от предложенных мероприятий составит 16 332,21 млн руб.

Применение технологии интервального регулирования предусматривает усиление горловин железнодорожных станций для возможности пропуска поездов с использованием обоих главных путей для правильного и неправильного движения, с этой целью в статье предлагается два варианта модернизации станции $У_1$.

Первый вариант предусматривает сооружение в горловинах станции дополнительных параллельных выходов как для четного, так и для нечетного направлений:

– укладка соединительного пути стрелочными переводами марки 1/11 в западной горловине станции между четырнадцатым приемо-отправочным и вторым главным путями, с целью возможности одновременного отправления со станции нечетных поездов и параллельного приема четных, исключая враждебность маршрутов, что позво-

лит обеспечить параллельный выход и усилить горловину;

– установка обратного съезда между главными путями для параллельного приема четных и нечетных поездов в западной горловине станции;

– установка двух обратных съездов в восточной горловине для использования обоих главных путей для правильного и неправильного движения.

Второй вариант. Технология отцепки поездов локомотивов от прибывающих поездов предусматривает их постановку в локомотивное депо. Проектной особенностью схемы станции $У_1$ является высокая степень враждебности перемещения внутри станции. При отправлении нечетных поездов после операций по отцепке / прицепке локомотива наблюдается перекрытие маршрута приема пассажирского поезда. Подача локомотива происходит с пересечением главных путей.

Суммарный экономический эффект от изменения показателей работы станции составит 13 727,98 млн руб.

Заключение

Проектным решением, направленным на оптимизацию работы участка железнодорожной линии Восточного полигона, предложено изменение технологии его работы в условиях внедрения современных систем интервального регулирования движения поездов (виртуальная сцепка, микропроцессорная автоблокировка с подвижным блок-участком) – «Комплекс аппаратно-программных средств для пространственного разграничения поездов на участке с обеспечением требований безопасности движения поездов». Применение данной технологии за счет сокращения межпоездного интервала позволит увеличить грузооборот до 18 725,924 млн т-км в год.

Список литературы

1. Стратегия развития Холдинга «РЖД» на период до 2030 года. М: ОАО «РЖД», 20.12.2013 г.
2. Российские железные дороги. Официальный сайт. URL: <http://www.rzd.ru> (дата обращения 05.04.2021).
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 № 877-р «О стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.»
4. Восточный полигон. URL: http://www.gudok.ru/sujet/eastern_polygon.
5. БАМ и Транссиб работают на пределе пропускной способности. URL: <http://eurasiancenter.ru/infrastructureexperts/20150505/1004085409.html>.
6. Оленевич В.А., Гозбенко В.Е. Методическое и программное обеспечение прогнозирования значений уровня безопасности функционирования железнодорожной транспортной системы. Иркутск, 2019.
7. Гозбенко В.Е., Оленевич В.А. Повышение безопасности работы железнодорожной транспортной системы на основе автоматизации технологии размещения и крепления груза в вагоне // Известия Транссиба. 2013. № 1 (13). С. 110–116.
8. Olentsevich V.A., Konyukhov V.Y., Olentsevich A.A., Lysenko D.A. Efficiency of implementation of interval traffic regulation by the virtual coupling system on the section of the railway line in the framework of the digital railway project Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1661(1), 012106
9. Розенберг И.Н., Розенберг Е.Н. Интеллектуальные системы управления движением поездов // Экономика железных дорог, 2016, № 8. С. 9–16.
10. Цифровые технологии : тематическая подборка / сост. Р.Б. Горбач, Е.М. Розентальс; отв.за выпуск Голубев. Красноярск КрЦНТИБ. 2018. 130 с.
11. Интервальное регулирование: инновации и перспективы развития: тематическая подборка / сост. Е.М. Розентальс, Н.В. Буйнова; отв. за выпуск Е.В. Шавыркина. Красноярск: КрЦНТИБ, 2019. 232 с.

12. Белоголов Ю.И., Стецова Ю.М., Оленевич А.А. Использование методов математического моделирования при управлении транспортными процессами на железной дороге // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск: ИрГУПС. 2018. Т. 1. С. 145–148.
13. ERTMS ATLAS 2012/ V. Carpinelli, A. Missoumi, E. Brutin, C. Filippini – International Union of Railways (UIC). Paris, 2012. 258 p.
14. ERTMS specifications. URL: <http://www.era.europa.eu/Core-Activities/ERTMS/Pages/Set-of-specifications-2.aspx>.
15. System Requirements Specification / UNISIG SUBSET-026/Version 3.3.0. 2013. URL: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/Set-2-Svstem-Requirements-Specification.aspx>.
16. Olentsevich V.A., Belogolov Y.I., Kramynina G.N. Set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improvement of section performance indicators based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. 832(1), 012038.
17. Оленевич В.А., Лебедева А.Е. Оценка существующих методик по увеличению пропускной и перерабатывающей способностей железнодорожных станций // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2016. Т. 2. С. 19–23.
18. Апатцев В.И., Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Подорожкина А.В. Альбом горловин участковых станций. Москва, 2021.
19. Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Котельников С.С. Развитие методов оптимизации технических и технологических параметров железнодорожных станций. Москва, 2020.
20. Апатцев В.И., Иванкова Л.Н., Иванков А.Н. Железнодорожные станции и узлы. В 2 ч. Ч. 1. Москва, 2020.
21. Иванков А.Н., Иванкова Л.Н. Железнодорожные станции и узлы. Проектирование новой узловой участковой станции с горкой малой мощности. Москва, 2020.
22. Об утверждении методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования: приказ Министерства Транспорта Российской Федерации от 18.07.2018 г. №266. 2018 г. 40 с.

References

1. Strategiya razvitiya Kholdinga «RZHD» na period do 2030 goda [Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030]. Moscow: JSC "Russian Railways", December 20, 2013.
2. Rossiyskiye zheleznyye dorogi [Russian Railways]. Official website. URL: <http://www.rzd.ru> Accessed: April 05, 2021.
3. Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17.06.2008 № 877-r «O strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 g.» [«On the strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030»].
4. Vostochnyy poligon [Vostochny polygon]. URL: http://www.gudok.ru/sujet/eastern_polygon.
5. BAM i Transsib rabotayut na predele propusknoy sposobnosti [BAM and Transsib operate at the capacity limit]. URL: <http://eurasiancenter.ru/infrastructureexperts/20150505/1004085409.html>.
6. Olentsevich V.A., Gozbenko V.E. Metodicheskoye i programnoye obespecheniye prognozirovaniya znacheniy urovnya bezopasnosti funktsionirovaniya zheleznodorozhnoy transportnoy sistemy [Methodological and software for forecasting the values of the safety level of the railway transport system]. Irkutsk, 2019.
7. Gozbenko V.E., Olentsevich V.A. Povysheniye bezopasnosti raboty zheleznodorozhnoy transportnoy sistemy na osnove avtomatizatsii tekhnologii razmeshcheniya i krepleniya gruzha v vagone [Improving the safety of the railway transport system based on automatization of the technology of placing and securing cargo in a wagon]. *Izvestiya Transsiba [Izvestiya Transsib]*, 2013, No. 1(13), pp. 110–116.
8. Olentsevich V.A., Konyukhov V.Y., Olentsevich A.A., Lysenko D.A. Efficiency of implementation of interval traffic regulation by the virtual coupling system on the section of the railway line in the framework of the digital railway project. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1661(1), 012106.
9. Rosenberg I.N., Rosenberg E.N. Intellektual'nyye sistemy upravleniya dvizheniyem poyezdov [Intelligent train traffic control systems]. *Ekonomika zheleznykh dorog [Economics of railways]*, 2016, No. 8, pp. 9–16.
10. Tsifrovyye tekhnologii : tematicheskaya podborka [Digital technologies: thematic selection]. Comp. R.B. Gorbach, E.M. Rosental; rel. for the release of Golubev. Krasnoyarsk KRTSNTIB, 2018. 130 p.
11. Interval'noye regulirovaniye: innovatsii i perspektivy razvitiya: tematicheskaya podborka [Interval regulation: innovations and development prospects: thematic selection]. Comp. E.M. Rosenthal, N.V. Buyanova; rel. for the release of E.V. Shavyrkin. Krasnoyarsk: KRTSNTIB, 2019. 232 p.
12. Belogolov Yu.I., Startseva Yu.M., Lantsevich A.A. Ispol'zovaniye metodov matematicheskogo modelirovaniya pri upravlenii transportnymi protsessami na zheleznoy doroge [The use of mathematical modeling methods in the management of transport processes on the railway]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018, Vol. 1, pp. 145–148.
13. Carpinelli V., Missoumi A., Brutin E., Filippini C. International Union of Railways (UIC). ERTMS ATLAS 2012. Paris, 2012. 258 p.
14. ERTMS specifications. URL: <http://www.era.europa.eu/Core-Activities/ERTMS/Pages/Set-of-specifications-2.aspx>.
15. System Requirements Specification. UNISIG SUBSET-026/Version 3.3.0. 2013. URL: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/Set-2-Svstem-Requirements-Specification.aspx>.
16. Olentsevich V.A., Belogolov Y.I., Kramynina G.N. Set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improvement of section performance indicators based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 832(1), 012038.

17. Olentsevich V.A., Lebedeva A.E. Otsenka sushchestvuyushchikh metodik po uvelicheniyu propusknoy i pererabatyvayushchey sposobnostey zheleznodorozhnykh stantsiy [Evaluation of existing methods for increasing the throughput and processing capacity of railway stations]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*. Irkutsk, 2016, Vol. 2, pp. 19–23.

18. Apattsev V.I., Ivankova L.N., Ivankov A.N., Podorozhkina A.V. Al'bom gorlovin uchastkovykh stantsiy [Album of necks of precinct stations]. Moscow, 2021.

19. Ivankova L.N., Ivankov A.N., Kotelnikov S.S. Razvitiye metodov optimizatsii tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov zheleznodorozhnykh stantsiy [Development of optimization methods for technical and technological parameters of railway stations]. Moscow, 2020.

20. Apattsev V.I., Ivankova L.N., Ivankov A.N. Zheleznodorozhnyye stantsii i uzly [Railway stations and junctions]. In 2 parts. Part 1. Moscow, 2020.

21. Ivankov A.N., Ivankova L.N. Zheleznodorozhnyye stantsii i uzly. Proyektirovaniye novoy uzlovoy uchastkovoy stantsii s gorkoy maloy moshchnosti [Railway stations and junctions. Design of a new nodal station with a low-power slide]. Moscow, 2020.

22. Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya propusknoy i provoznoy sposobnostey infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshchego pol'zovaniya: prikaz Ministerstva Transporta Rossiyskoy Federatsii ot 18.07.2018 №266 [On approval of the methodology for determining the capacity and carrying capacity of the infrastructure of public railway transport: Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 18.07.2018 No. 266], 2018. 40 p.

Информация об авторах

Оленцевич Виктория Александровна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olencevich_va@mail.ru

Оленцевич Арина Александровна – магистрант направления Control Science and Engineering факультета School of Automation, Beijing Institute of Technology, г. Beijing, e-mail: olencevich_va@mail.ru

Гозбенко Валерий Ерофеевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

Information about the authors

Viktoriya A. Olencevich – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor; Associate Professor of the Subdepartment of Operation Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olencevich_va@mail.ru

Arina A. Olentsevich – Master Control Science and Engineering of School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing, e-mail: olencevich_va@mail.ru

Valerii E. Gozbenko – Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

Разработка технологической оснастки для смены элементов рессорного комплекта тележек грузовых вагонов

Е. А. Рожкова✉, И. В. Ковригина

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация

✉ helenyuys@mail.ru

Резюме

Укрупненный пробег между ремонтами обязан подтверждаться не только расчетами, но и опытным контролем эксплуатации тележек. Одним из главных параметров, по которому может быть определен пробег между плановыми видами ремонта, является износ в парах трения частей тележки. Для гашения колебаний вагона, возникающих под воздействием неровностей железнодорожного пути, в составе ходовых частей широко применяются клиновые гасители колебаний. Основным рабочим элементом их конструкции является фрикционный клин. Под воздействием возникающих нагрузок, в результате сил трения с надрессорной балкой и фрикционной планкой, кинетическая энергия колебаний преобразуется в тепловую энергию. Наиболее распространенной причиной отцепок вагонов в текущий ремонт является неисправность тележки по причине выхода из строя рессорного подвешивания. В данной работе выполнено определение наработки вагона до максимального износа фрикционных клиньев. Спроектировано новое приспособление для смены элементов рессорных комплектов грузовых вагонов в условиях ПРО. Вновь разработанное приспособление предназначено для смены фрикционных клиньев и планок, и пружин. Оно состоит из гидравлического домкрата, стоек и рычагов. Данное приспособление также может быть использовано для выполнения работ на ремонтных путях участков текущего отцепочного ремонта с целью создания дополнительных ремонтных позиций и сокращения простоя вагонов в ремонте. Выполнен расчет стоимости замены фрикционных клиньев за жизненный цикл грузового вагона.

Ключевые слова

рессорный комплект, фрикционный клин, фрикционная планка, грузовой вагон, надрессорная балка

Для цитирования

Рожкова Е. А. Разработка технологической оснастки для смены элементов рессорного комплекта тележек грузовых вагонов / Е. А. Рожкова, И. В. Ковригина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 158–164. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).158-164

Информация о статье

поступила в редакцию: 16.09.2021, поступила после рецензирования: 27.09.2021, принята к публикации: 07.10.2021

Development of technological equipment for changing components of freight car trolley sheet-spring set

Е. А. Rozhkova✉, I. V. Kovrigina

Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, the Russian Federation

✉ helenyuys@mail.ru

Abstract

The enlarged mileage between repairs must be confirmed not only by calculations, but also by experimental control of the trolley operation. One of the main parameters by which the mileage between scheduled repairs can be determined is the wear in friction pairs of the trolley parts. To dampen the wagon vibrations resulting from irregularities of the railway track, wedge dampers of co-swans are widely used in the chassis. The main working element of their structure is a friction wedge. Under the emerging loads, and resulting from friction forces between an upper spring beam and a friction bar, the kinetic energy of oscillations is converted into thermal energy. The most common reason for car uncoupling and ongoing repairs is a failure of the trolley due to a spring suspension breakdown. In this work, car operating time is determined up to the maximum wear of friction wedges. A new device has been designed for replacing the elements of spring sets of freight cars under TMP conditions. The newly developed accessory is intended for replacement of friction wedges and slats, as well as springs. It consists of a hydraulic jack, struts and levers. It can also be used to carry out work on the repair tracks of the current disconnection repair sections in order to create additional repair positions and reduce the downtime of cars in repair. The cost of replacing the friction wedges for the life cycle of the freight car was calculated.

Keywords

spring set, friction wedge, friction bar, freight car, overstress beam

For citation

Rozhkova E.A., Kovrigina I.V. Razrabotka tekhnologicheskoi osnastki dlya smeny elementov ressnornogo komplekta telezhok gruzovykh vagonov [Development of technological equipment for changing components of freight car trolley sheet-spring set]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 158–164.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).158-164

Article Info

Received: 16.09.2021, Revised: 27.09.2021, Accepted: 07.10.2021

Введение

Узел гашения колебаний грузового вагона расположен в боковой раме тележки и состоит из рессорного комплекта, фрикционных планок и клиньев. У тележки модели 18-100 рессорный комплект имеет линейную вертикальную силовую характеристику. Фрикционные клинья тележек модели 18-100 изготавливаются из чугуна марок СЧ-25, СЧ-35. Механические свойства данных чугунов определены ГОСТ 1412-85. В частности, временное сопротивление при растяжении у данных чугунов составляет 25 и 35 МПа соответственно. В настоящее время различают фрикционные клинья, выполненные из высокопрочного чугуна и фрикционные клинья для тележек моделей 18-9855, 18-9810 [1–3].

Целью данной работы является определение наработки вагона до максимального износа фрикционных клиньев и разработки нового приспособления для смены элементов рессорного комплекта тележки грузового вагона, а также определение стоимости замены фрикционных клиньев за жизненный цикл грузового вагона.

Научная новизна работы заключается в проектировании технологической оснастки для смены элементов рессорного комплекта тележек грузовых вагонов.

Определение наработки вагона до максимального износа фрикционных клиньев

Максимальная величина износа фрикционного клина составляет 9 мм (рис. 1). Для определения наработки вагона до максимального износа фрикционных клиньев составим вспомогательную таблицу для расчета коэффициентов линейной функции методом наименьших квадратов (табл. 1).

Таблица 1. Вспомогательная таблица для расчета коэффициентов линейной функции методом наименьших квадратов (износ фрикционных клиньев)

Table 1. Auxiliary table for calculation of linear function by the least square method (friction wedge wear)

k	x	x^2	y	xy	\hat{y}
1	0	0	0	0	-0,08
2	65	4 225	1	65	1,21
3	145	21 025	3	435	2,79
4	210	44 100	4	840	4,08
Σ	420	69 350	8	1 340	8,24

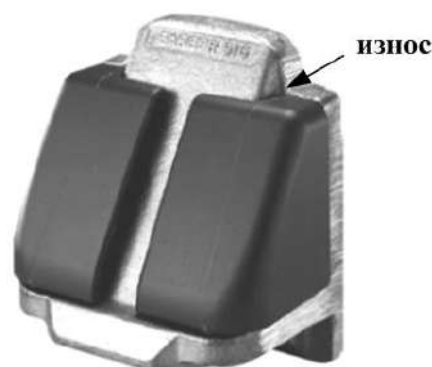


Рис. 1. Износ фрикционного клина
Fig. 1. Wear of a friction wedge

Произведем расчет коэффициентов линейной функции:

$$a = \frac{(4 \times 1320 - 420 \times 8)}{4} \times 69350 - 420^2 = 0,0198; b = 4 - a \times 420 = -0,0792.$$

Линейная функция, находящая величину износа, будет иметь вид:

$$y = 0,0198x - 0,0792.$$

График линейной функции в сочетании с размерами (данными замеров) поднадзорной эксплуатации грузовых вагонов на Забайкальской железной дороге показан на рис. 2. На графике видим, что уравнение описывает эмпирические данные примерно на 99 %.

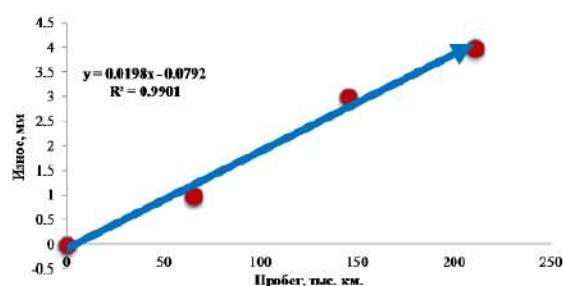


Рис. 2. График линейной функции в сочетании с размерами (данными замеров) поднадзорной эксплуатации (износ фрикционных клиньев)
Fig. 2. Linear function graph combined with dimensions (measuring data) of supervised operation (wear of friction wedges)

График функции, рассчитывающей пробег подвижного состава до максимального износа фрикционного клина, показан на рис. 3.

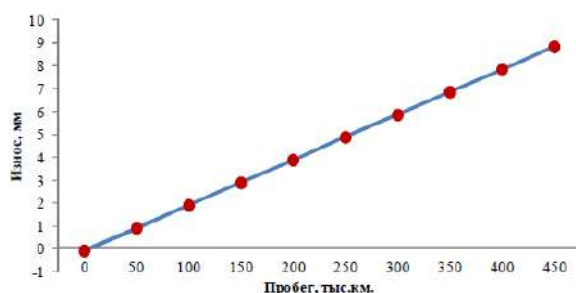


Рис. 3. График функции, рассчитывающей пробег подвижного состава до максимального износа фрикционного клина

Fig. 3. Function graph calculating rolling stock mileage up to maximum wear of friction wedge

Отсюда следует, что максимальный износ фрикционного клина происходит при наработке подвижного состава 450 тыс. км.

После выявления неисправностей вагон, требующий текущего отцепочного ремонта, подают на ремонтные пути. Замена элементов рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов происходит на специальных ремонтных путях с применением специализированного технологического оборудования, при этом процесс отцепки и подачи вагона для устранения неисправностей по замене элементов рессорного подвешивания занимает длительное время и приводит к увеличению времени простоя вагонов на станции [4, 5]. Внедрение приспособления для смены элементов рессорного комплекта грузовых вагонов способствует сокращению времени простоя, снижению затрат на обслуживание техно-

логического оборудования, а также уменьшению времени оборота вагона.

Техническое описание вновь разработанного приспособления для смены элементов рессорного комплекта грузовых вагонов

Разработанное приспособление предназначено для смены элементов рессорных комплектов грузовых вагонов: внутренних и наружных пружин, фрикционных клиньев, фрикционных планок в условиях пункта технического обслуживания.

Данное приспособление также может быть использовано для выполнения работ на ремонтных путях участков текущего отцепочного ремонта с целью создания дополнительных ремонтных позиций и сокращения простоя вагонов в ремонте [6–8]. Для обеспечения оперативной доставки составных частей приспособления к месту ремонта используются две транспортировочные тележки. При необходимости применения разработанного приспособления для технического обслуживания порожних вагонов достаточно оборудования, размещенного в одной транспортировочной тележке. Работа по смене элементов рессорных комплектов выполняется двумя работниками. Тележки транспортировочные с оборудованием доставляются к месту ремонта вдоль поезда по междупутьям. Схема установки оборудования представлена на рис. 4, техническая характеристика приспособления приведена в табл. 2.

Напротив надрессорной балки с обоих концов на балластный слой горизонтально выставляются настилы. На настилы устанавливаются гидравлические домкраты с закрепленными на головках домкратов насадками. В гнезда насадок устанавливаются стойки винтовые и шарнирные и выкручиваются винты головки шарнирные выставляются на уровень внутренних нижних плоскостей зева надрессорной балки.

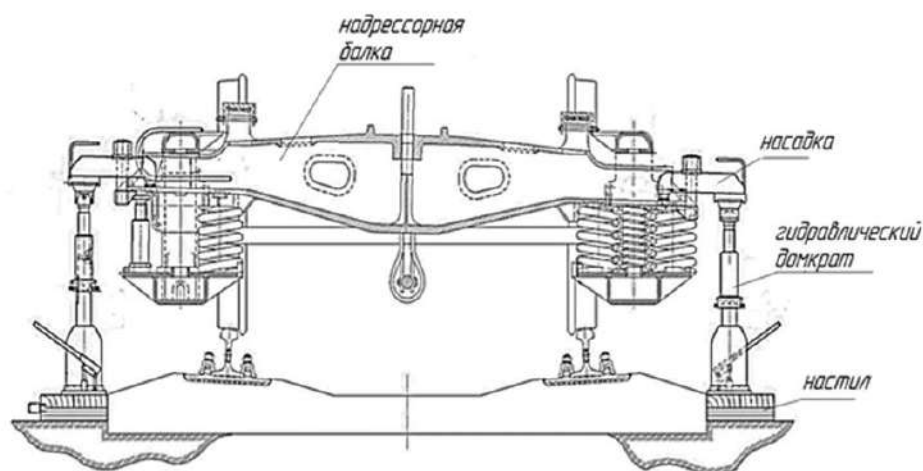


Рис. 4. Разработанное устройство для смены элементов рессорных комплектов грузовых вагонов

Fig. 4. Designed device for replacement of elements of freight car string sets

При установке в зев рычагов насадки обезоруживающей предварительно определяют потребность в установке под рычагами регулировочных прокладок. При опирании на нижнюю плоскость зева горизонтально выставленной насадки зазор между верхними плоскостями рычагов и верхней плоскостью зева надрессорной балки должен быть не более 5 мм (проверяется приложением прокладки толщиной 5 мм). Корпус насадки устанавливается цилиндрической поверхностью диаметром 120 мм на опорную поверхность шарнирной головки. При недостаточности хода винта винтовой шарнирной стойки производится подъем штока гидравлического домкрата до установки рычагов насадки в горизонтальное положение. Винтовой зацеп плотно подводится под нижнюю стенку зева, резьбовая часть его заводится между рычагами насадки, на нее одевается пластина, проточки пластины ориентируются параллельно рычагам. Гайка накручивается вручную до упора. Установку насадок и винтовых зацепов можно проводить поочередно совместными усилиями обоих участников процесса. В зазор между верхними плоскостями рычагов насадки и верхней стенкой зева устанавливаются регулировочные прокладки толщиной 2 и 3 мм. Зазор уменьшается до величины не более 2 мм. Наличие минимального зазора обеспечивает дополнительную меру безопасности. В случае излома винтового зацепа или ненадежной его установки происходит зависание надрессорной балки на рычагах насадки. Начальный этап подъема производится с обоих концов балки одновременно. После того, как фрикционные клинья с обезгруживаемого конца балки поднимутся до уровня, соответствующего порожнему состоянию вагона, подъем продолжается только с той стороны, где будут

выполняться ремонтные работы. После смыкания верхней стенки зева с верхним поясом боковой рамы можно приступить к замене неисправных элементов рессорных комплектов. Из рессорного проема извлекается исправный пружинный комплект и на его место устанавливается страховочный упор. Винт упора выкручивается до касания с бонкой надрессорной балки и обеспечивает безопасное производство работ. При необходимости замены пружинного комплекта замеряется высота пружин извлеченного пружинного комплекта [9–11].

При снятии и установке подклинового пружинного комплекта для фиксации фрикционного клина в верхнем положении применяется скоба поддержки клина. Все работы по замене элементов выполняются согласно технологическому процессу.

Расчет стоимости замены фрикционных клиньев за жизненный цикл грузового вагона

В работах [12, 13] представлено вычисление эксплуатационного положения фрикционного клина на основании интенсивности износа трущихся пар узла гашения колебаний с целью определения величины межремонтного пробега вагона. Определим среднюю наработку деталей до предельного износа на основе экспериментальных данных по отцепкам грузовых вагонов по завышению фрикционных клиньев. Выравнивание экспериментальных данных строилось на гипотезе о нормальном распределении интенсивности износа фрикционных клиньев [14] (табл. 3). Диаграмма плотности вероятностей представлена на рис. 5.

Таблица 2. Технические характеристики устройства

Table 2. Technical characteristics of the device

Наименование параметра	Значение
Грузоподъемность домкратов гидравлических, тн	30
Суммарная расчетная вертикальная нагрузка на приспособление, кН (тн)	387 (38,7)
Максимальная вертикальная нагрузка на насадку обезгруживающую, кН (тн)	213,5 (21,35)
Допустимый исходной уровень расположения нижней горизонтальной поверхности зева надрессорной балки от уровня балластного слоя, мм	585–835
Вес транспортировочной тележки:	
в снаряженном состоянии, кг	98,3
в порожнем состоянии, кг	25,2
Тяговое усилие при перемещении снаряженной транспортировочной тележки:	
по щебеночному покрытию, кг	2,5
по асфальтобетонному покрытию, кг	до 1
по укатанному снегу, кг	14
Угол наклона вперед тележки транспортировочной при перемещении, °	15–20
Угол отклонения головки винтовой шарнирной стойки от вертикальной оси, °	до 8
Замер высоты пружин рессорного комплекта – на рабочем месте с использованием приспособления для измерения высоты пружин:	
диапазон высот измеряемых пружин, мм	220–300
диапазон диаметров средней линии пружин, мм	100–230

Таблица 3. Выравнивание данных по наработке фрикционных клиньев
Table 3. Data alignment for wearing out of friction wedges

Середина интервала	Частота	Относительная частота	Выборочное среднее	Значение аргумента	Значение функции	Теоретическая частота	Значение χ^2
25	4	0,04	1,00	-1,94	0,0790	3,76	0,01
40	8	0,08	3,20	-1,46	0,1647	7,85	0,00
55	12	0,12	6,60	-0,99	0,2756	13,13	0,10
70	16	0,16	11,20	-0,51	0,3697	17,61	0,15
85	19	0,19	16,15	-0,03	0,3977	18,95	0,00
100	16	0,16	16,00	0,44	0,3448	16,43	0,01
115	12	0,12	13,80	0,92	0,2396	11,42	0,03
130	7	0,07	9,10	1,40	0,1334	6,36	0,07
145	4	0,04	5,80	1,87	0,0596	2,84	0,47
160	2	0,02	3,20	2,35	0,0213	1,01	0,96
Σ	100	1,00	86,05	–	–	99,36	1,80

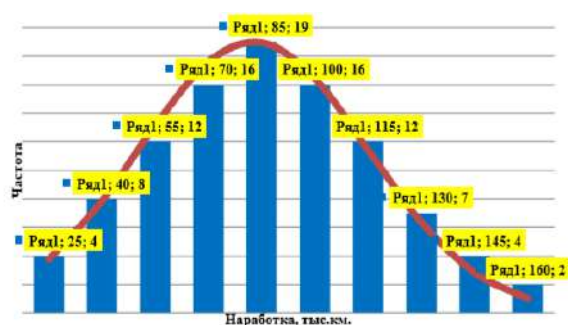


Рис. 5. Распределение наработки фрикционных клиньев до предельного износа

Fig. 5. Friction wedge wearing off distribution until ultimate wear

Таким образом, средняя наработка фрикционного клина до предельного износа составляет 86 тыс. км. Соответственно, зная интенсивность износа фрикционного клина, можно определить количество замен деталей за жизненный цикл грузового вагона [15–18]. Определим суммарный пробег вагона за назначенный срок службы, учитывая, что за месяц средний пробег полувагона составляет 10 000 км. Тогда для стандартных полувагонов со

сроком службы 22 года пробег будет равен 2 млн 640 тыс. км.

Соответственно количество замен комплектов фрикционных клиньев для стандартных полувагонов будет составлять 30.

Определим суммарные расходы, связанные с заменами фрикционных клиньев по предельному износу за назначенный срок службы вагона. В расчете будем использовать следующие уточнения:

1. Базовая стоимость одного фрикционного клина 2 тыс. руб.
2. Замены фрикционных клиньев производятся комплектами (один комплект включает 8 фрикционных клиньев).
3. Для определения стоимости фрикционных клиньев в произвольный момент времени рассчитывается по следующей формуле:

$$P_t = P \cdot (1 + i)^t,$$

где P – базовая стоимость одного фрикционного клина; i – коэффициент дисконтирования [10, 11].

Коэффициент дисконтирования базовой стоимости фрикционного клина 5 %.

Результаты расчета по стоимости замен фрикционных клиньев за назначенный срок службы

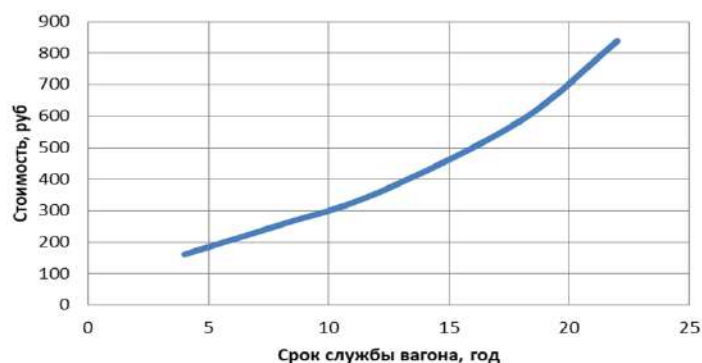


Рис. 6. Стоимость замены фрикционных клиньев за назначенный срок службы стандартного полувагона

Fig. 6. Friction wedge replacement cost for estimated service time of a standard semi-car

стандартного полувагона представлены на рис. 6.

Таким образом, стоимость замены фрикционных клиньев за назначенный срок службы стандартного полувагона составляет 838,36 тыс. руб.

Заключение

В данной работе выполнено определение наработки вагона до максимального износа фрикционных клиньев. Максимальный износ фрикционного клина достигнет при наработке подвижного состава 450 тыс. км. Спроектировано новое приспособление для смены элементов рессорных комплектов грузовых вагонов в условиях ПТО. Вновь разработанное приспособление предназначено для смены фрикци-

онных клиньев и планок, и пружин. Выполнен расчет стоимости замен фрикционных клиньев за жизненный цикл грузового вагона. Для этого на первоначальном этапе была определена средняя наработка клиньев до предельного износа, которая составила 86 тыс. км и распределена по нормальному закону. Расчеты показали, что у стандартных полувагонов за назначенный срок службы 22 года будет выполнено порядка 30 замен комплектов фрикционных клиньев, что в денежном эквиваленте с учетом дисконтирования их стоимости составит более 800 тыс. руб.

Список литературы

1. Грабец А.В. Оценка износа фрикционного клина узла гашения колебаний тележки грузового вагона / А.В. Грабец, И.В. Лёвкин, М.В. Сапетов, А.В. Семёнов // Ползуновский вестник. 2015. № 4. С. 16–18.
2. ГОСТ 34503-2018 Клинья фрикционные тележек грузовых вагонов. Общие технические условия.
3. Письменный Е.А. Разработка и расчет на прочность новой конструкции фрикционного клина узла гашения колебания тележки грузового вагона / Е.А. Письменный, А.В. Грабец, А.М. Марков, Д.А. Грабец // Инженерный вестник дона. 2020. № 5. С. 22.
4. Ковригина И.В. Определение межремонтного ресурса грузового вагона / И.В. Ковригина // Наука и образование транспорту. 2017. № 1. С. 45–48.
5. Гордиенко И.А. Статистическая оценка наработки до отказа полувагонов в межремонтном периоде / И.А. Гордиенко, Т.В. Иванова, Д.Г. Налабордин // Вагоны и вагонное хозяйство. 2014. № 4. С. 44–46.
6. Справочные материалы причин поступления грузовых вагонов в текущий отцепочный ремонт за 2019 год / Центральная дирекция инфраструктуры управления вагонного хозяйства, проектно-конструкторское бюро вагонного хозяйства. М., 2019. 153 с.
7. Статистические методы обработки эмпирических данных. Рекомендации / ВНИИНАШ. М.: Изд-во стандартов, 1978. 232 с.
8. Володарский В.А. О надежности подвижного состава прошедшего ремонт / В.А. Володарский, А.И. Орленко // Надежность. 2015 № 1. С. 25–28.
9. Рожкова Е.А. Анализ устойчивости вагона от опрокидывания при движении в кривых участках пути различного радиуса / Е.А. Рожкова, А.Н. Астафьева, Т.А. Баранова // Молодая наука Сибири. 2020. № 2. С. 62–67.
10. Халафян А.А. Статистический анализ данных: 3-е изд., учебник / А.А. Халафян. М.: Бинном-Пресс, 2007. 512 с.
11. Ковригина И.В., Рожкова Е.А. Влияние на безопасность движения качества ремонта вагонов // Образование – Наука – Производство: материалы III Всерос. науч.-практ. конф., 20 декабря 2019 г. Чита: ЗаБИЖТ ИрГУПС, 2019. 360 с.
12. Налабордин Д.Г. Оценка взаимосвязи наработки грузовых вагонов на отказ и причин отказов // Естественные и технические науки, 2011. № 1. С. 268–270.
13. Орлова А.М., Лесничий В.С., Артамонов Е.И. Исследование влияния состояния тележек грузовых вагонов на боковой износ гребней колес по результатам математического моделирования и обследования вагонов в эксплуатации // Наука и прогресс транспорта. Вестник днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2008. С. 69–75.
14. Малашкевич Э.А. Прогнозирование отказов грузовых вагонов на основе анализа статистической информации / Э.А. Малашкевич, В.А. Петровых, Д.Г. Налабордин // Вагоны и вагонное хозяйство. 2013. № 1. С. 34–37.
15. Рожкова Е.А. Совершенствование процесса технологии смены элементов лопочного подвешивания пассажирских вагонов / Е.А. Рожкова, И.В. Ковригина // Вестник РГУПС. 2020. № 4 (80). С. 45–54. DOI: 10.46973/0201-727X_2020_4_45.
16. Шадур Л.А. Расчет вагонов на прочность / С.В. Вершинский, Е.Н. Никольский, Л.Н. Никольский, А.А. Попов, Л.А. Шадур // М.: Машиностроение, 1971. 432 с.
17. Нормы для расчета и проектирования вагонов, железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» – ГосНИИВ – ВНИИЖТ. М., 1996. 319 с.
18. Железняк В.Н., Кушков М.Г., Мартыненко Л.В. Анализ выявления причин неисправностей буксовых узлов грузовых вагонов на восточном полигоне // Молодая наука Сибири. 2020. № 2 (8). С. 1–8.

References

1. Grabets A.V., Levkin I.V., Sapetov M.V., Semenov A.V. Otsenka iznosa friktsionnogo klina uzla gasheniya kolebaniya telezhki gruzovogo vagona [Assessment of wear of the friction wedge of the vibration damping unit of the freight car trolley]. *Polzunovskiy vestnik [Polzunovsky bulletin]*, 2015, No. 4, pp. 16–18.
2. GOST 34503-2018 Klin'ya friktsionnyye telezhki gruzovykh vagonov. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Friction wedges of freight car bogies. General specifications].

3. Pis'mennyy E.A., Grabets A.V., Markov A.M., Grabets D.A. Razrabotka i raschet na prochnost' novoy konstruksii friksionnogo klina uzla gasheniya kolebaniya telezhki gruzovogo vagona [Development and calculation of the strength of the new design of the friction wedge of the freight car trolley vibration quenching unit]. *Inzhenernyy vestnik dona [Engineering Bulletin Don]*, 2020, No. 5, p. 22.
4. Kovrigina, I.V. Opredeleniye mezhremontnogo resursa gruzovogo vagona [Definition of the overhaul resource of a freight car]. *Nauka i obrazovaniye transportu [Science and Education in Transport]*, 2017, No. 1, pp. 45–48.
5. Gordienko I.A., Ivanova T.V., Nalabordin D.G. Statisticheskaya otsenka narabotki do otkaza poluvagonov v mezhremontnom periode [Statistical assessment of the operating time before the failure of gondola cars in the inter-repair period]. *Vagony i vagonnoye khozyaystvo [Wagons and car farming]*, 2014, No. 4, pp. 44–46.
6. Spravochnyye materialy prichin postupleniya gruzovykh vagonov v tekushchiy ottsepochnyy remont za 2019 god [Reference materials for the reasons for the arrival of freight cars in the current uncoupling repair for 2019]. Tsentral'naya direktsiya infrastruktury upravleniya vagonnogo khozyaystva, proyektno-konstruktorskoye byuro vagonnogo khozyaystva [Central Directorate of Wagon Management Infrastructure, Design Bureau of Wagon Management]. Moscow, 2019. 153 p.
7. Statisticheskiye metody obrabotki empiricheskikh dannykh [Statistical methods of empirical data processing]. Recommendations / VNIINMASH. Moscow: Publishing House of Standards, 1978. 232 p.
8. Volodarsky V.A., Orlenko A.I. O nadezhnosti podvizhnogo sostava proshedshego remont [On the reliability of rolling stock repaired]. *Nadezhnost' [Reliability]*, 2015, No. 1, pp. 25–28.
9. Rozhkova E.A., Astafiev A.N., Baranova T.A. Analiz ustoychivosti vagona ot oprokidyvaniya pri dvizhenii v krivykh uchastkakh puti razlichnogo radiusa [Analysis of the stability of the car against overturning when moving in curved sections of the track of various radii]. *Molodaya nauka Sibiri [Young Science of Siberia]*, 2020, No. 2, pp. 62–67.
10. Khalafyan A.A. Statisticheskiy analiz dannykh: 3-ye izd., uchebnik [Statistical data analysis: 3rd ed., textbook]. Moscow: Binom-Press Publ., 2007. 512 p.
11. Kovrigina I.V., Rozhkova E.A. Vliyaniye na bezopasnost' dvizheniya kachestva remonta vagonov [Impact on the safety of car repair quality]. *Obrazovaniye – Nauka – Proizvodstvo: materialy III Vseros. nauch.-prakt. konf., 20 dekabrya 2019 g [Education - Science - Production: Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference, December 20, 2019]*. Chita: ZabIZHT IrGUPS, 2019. 360 p.
12. Nalabordin D.G. Otsenka vzaimosvyazi narabotki gruzovykh vagonov na otkaz i prichin otkazov [Assessment of the relationship between the MTBF of freight cars for failure and the failure rank]. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki [Natural and technical sciences]*, 2011, No. 1, pp. 268–270.
13. Orlova A.M., Lesnichy V.S., Artamonov E.I. Issledovaniye vliyaniya sostoyaniya telezhok gruzovykh vagonov na bokovoy iznos grebney koles po rezul'tatam matematicheskogo modelirovaniya i obsledovaniya vagonov v ekspluatatsii [Study of the effect of the state of freight car bogies on lateral wear of wheel ridges based on the results of mathematical modelineation and examination of cars in operation]. *Nauka i progress transporta. Vestnik dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta [Science and transport progress. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport]*, 2008, pp. 69–75.
14. Malashkevich E.A., Petrovykh V.A., Nalabordin D.G. Prognozirovaniye otkazov gruzovykh vagonov na osnove analiza statisticheskoy informatsii [Forecasting of freight car failures on the basis of statistical information analysis]. *Vagony i vagonnoye khozyaystvo [Wagons and car farming]*, 2013, No. 1, pp. 34–37.
15. Rozhkova E.A., Kovrigina I.V. Sovershenstvovaniye protsessa tekhnologii smeny elementov lyulechnogo podveshivaniya passazhirsikh vagonov [Improvement of the process of changing the elements of the cradle suspension of passenger cars]. *Vestnik RGUPS [Bulletin of the RSTU]*, 2020, No. 4(80), pp. 45–54. DOI: 10.46973/0201-727X_2020_4_45.
16. Shadur L.A., Vershinsky S.V., Nikolsky E.N., Nikolsky L.N., Popov A.A. Raschet vagonov na prochnost' [Calculation of wagons for strength]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1971. 432 p.
17. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov, zheleznikh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Norms for the calculation and design of wagons, railways MPS gauge 1520 mm (non-self-propelled)]. GosNIIV – VNIIZHT. Moscow, 1996. 319 p.
18. Zheleznyak V.N., Kushkov M.G., Martynenko L.V. Analiz vyyavleniya prichin neispravnostey buksovykh uzlov gruzovykh vagonov na vostochnom poligone [Analysis of identifying the causes of malfunctions of freight car axle units]. *Molodaya nauka Sibiri [Young science of Siberia]*, 2020, No. 2(8), pp. 1–8.

Информация об авторах

Рожкова Елена Александровна – канд. техн. наук, доцент, кафедра подвижного состава железных дорог, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: helenuys@mail.ru

Ковригина Инна Владимировна – канд. техн. наук, доцент, кафедра подвижного состава железных дорог, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: innabella84@mail.ru

Information about the authors

Elena A. Rozhkova – Ph.D. in Engineering Science, associate professor, Subdepartment of Railway Rolling Stock, Zabaykalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: helenuys@mail.ru

Inna V. Kovrigina – Ph.D. in Engineering Science, associate professor, Subdepartment of Railway Rolling Stock, Zabaykalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: innabella84@mail.ru

Управление трением на дорожке катания как способ снижения силового взаимодействия в контакте «колесо – рельс»

И. Л. Парахненко✉

Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ iparahnenko@usurt.ru

Резюме

Взаимодействие пути и подвижного состава, а именно, снижение износа рельсов и колес, актуальное направление исследования в настоящее время в железнодорожной отрасли. Первоочередной мерой по улучшению взаимодействия в паре «колесо – рельс» в странах Европы, Америки и России принята лубрикация боковой поверхности наружной рельсовой нити. Вопрос эффективности лубрикации приобрел большое значение после опытов по нанесению смазочного материала на поверхность головки рельса (дорожку катания), проведенных на дорогах Северной Америки. По итогам экспериментов в прямых участках получено снижение силового воздействия на путь от колес подвижного состава, значительное снижение расходов, затрачиваемых на электрическую тягу и ремонт элементов верхнего строения и подвижного состава. В статье приведены результаты исследований вариантов трибологического состояния (изменение коэффициентов трения на дорожках катания) рельсовых нитей и выбор оптимального способа, обеспечивающего наилучшее взаимодействие колес подвижного состава и рельсов. Представленные варианты получены путем моделирования продольных и боковых сил в программном комплексе «Универсальный механизм». На основании полученных в ходе моделирования результатов сделаны выводы о положительном влиянии снижения коэффициента трения по дорожке катания рельсов на продольные и боковые силы, возникающие в зоне контакта «колесо – рельс», доказана безопасность нанесения смазочного материала на поверхность головок рельсов, рассчитана возможная экономия эксплуатационных расходов от снижения расходов на топливно-энергетические ресурсы.

Ключевые слова

коэффициент трения, продольная сила, боковая сила, дорожка катания рельса, лубрикация

Для цитирования

Парахненко И. Л. Управление трением на дорожке катания как способ снижения силового взаимодействия в контакте «колесо – рельс» // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 165–170. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).165-170

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.09.2021, поступила после рецензирования: 25.09.2021, принята к публикации: 02.10.2021

Control friction on the skate as a method of reducing force interaction in the «wheel – rail» contact

I. L. Parakhnenko✉

Ural State Transport University, Yekaterinburg, the Russian Federation

✉ iparahnenko@usurt.ru

Abstract

The interaction between track and rolling stock and, namely, the reducing of the wear of rails and wheels, is currently an up to date direction in the railway industry. The primary measure to improve the interaction in the "wheel-rail" pair in the countries of Europe, America and Russia is the lubrication of the side surface of the outer rail thread. The question of the effectiveness of lubrication has become very important after experiments on the application of a lubricant material on the surface of the rail head (skating track), conducted on the North American railroads. As a result of the experiments in straight sections, a reduction in the impact force on the track from the wheels of the rolling stock was obtained, as well as a significant reduction in the costs of electric traction and repair of elements of the upper structure and rolling stock. The article presents the results of studies of the variants of the tribological state (the friction coefficients changes on the riding tracks) of the rail threads and the choice of the optimal way to ensure the best interaction of the wheels of the rolling stock and the rails. The variants presented are obtained by modeling the longitudinal and lateral forces in the software package "Universal Mechanism". Based on the results obtained during the simulation, conclusions are drawn about the positive effect of the reduction of the friction coefficient along the track of the rails on the longitudinal and lateral forces arising in the contact zone "wheel-rail", the safety of applying lubricant to the surface of the rail heads is proved, the possible savings in operating costs from reducing the cost of fuel and energy resources are calculated.

Keywords

factor of friction, longitudinal force, lateral force, rail track, lubrication

For citation

Parakhnenko I. L. Upravlenie treniem na dorozhke kataniya, kak sposob snizheniya silovogo vzaimodejstviya v kontakte «koleso – rel's» [Friction control on the skate as a method of reducing force interaction in the «wheel – rail» contact]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 165–170. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).165-170

Article Info

Received: 10.09.2021, Revised: 25.09.2021, Accepted: 02.10.2021

Введение

Взаимодействие пути и подвижного состава, определяющие безопасность и бесперебойность движения, характеризуются скоростью, параметрами пути, динамическими процессами, трибологическими состояниями контактирующих поверхностей [1–4].

При анализе движения экипажа в кривой особого внимания заслуживают силы, возникающие в контакте «колесо – рельс»: вертикальная, горизонтальная, боковая [5].

Моделирование динамики контактного взаимодействия позволяет выполнить верифицированный программный комплекс «Универсальный механизм» [6, 7]. Использование данного комплекса обусловлено возможностью расчета сил взаимодействия, возникающих при одноточечном и многоточечном контактах, с вариантно-трибологического состояния рельсовых нитей при прохождении составом кривых участков [8].

Для расчета сил в программном комплексе используется система нелинейных уравнений, учитывающих относительную деформацию рельса и нормальные реакции в точках контакта. В работе принят алгоритм расчета сил, основанный на теории Калкера [9, 10]. Имитационное моделирование лубрикации в кривых задавалось изменением коэффициентов трения на поверхности катания.

Основной задачей исследования является построение зависимостей изменения продольных и боковых сил при изменении коэффициентов трения [11] на дорожке катания рельсовой нити, которые получены в ходе натурного эксперимента [12]. Для сухого трибологического состояния рельсовой колеи принято значение $f = 0,4$, при наличии третьего тела (смазки) $f = 0,25$ [13, 14]. На основании принятых коэффициентов составлены варианты:

- сухое состояние рельсов ($f = 0,4$);
- лубрикация дорожки катания наружного рельса ($f = 0,25$);
- лубрикация дорожки катания внутреннего рельса ($f = 0,25$).

Для моделирования создан грузовой состав длиной 968 м, общим весом 6 494 т. Для возможности разностороннего анализа выбран участок железнодорожного пути с кривыми различного радиуса – 990, 630, 540 и 380 м, общая длина 3 600 м. Расчеты велись для четырех скоростных режимов – от 40 до 80 км/ч.

Оценка «эффективности» рассматриваемых вариантов (2 и 3), т. е. уменьшение сил проведено в сравнении с сухим состоянием рельсов (вариант 1).

Результаты экспериментального моделирования продольных и боковых сил

Профиль участка пути, по которому проводилось моделирование – подъем, подразумевает тяговый режим движения поездов. Для максимального приближения результатов к реальным условиям проведены тяговые расчеты, в системе комплексных расчетов «ИСКРА – ПТР». Полученные для всех рассматриваемых скоростей данные интегрированы в ПК «Универсальный механизм».

Для обработки полученного массива данных и установления зависимостей принят метод статистической обработки исследований с помощью регрессионного анализа. Результаты представлены на рис. 1.

Полученные графики позволяют сделать вывод о максимально «эффективном» снижении продольных сил в контакте «колесо – рельс» относительно сухого состояния рельсов в варианте управления трением на дорожке катания наружной нити: 28 % в кривых радиусом до 1 000 м, 39 % в кривых малого радиуса. На дорожке катания внутреннего рельса в пологих кривых силы снижаются на 8 %. В кривых радиусом менее 400 м «эффективность» равна 27 %. При других радиусах силы снижаются на 14–19 %.

Далее представлены результаты моделирования боковых сил (рис. 2).

Полученные результаты зависимости боковых сил от радиуса при лубрикации на дорожке катания наружной рельсовой нити (вариант 2) показали увеличение сил относительно сухого состояния рельсов. На 11 % вырастают боковые силы в кривых радиусом менее 600 м. Эффективное снижение (до 23 %) при скорости 40 км/ч получено при снижении коэффициента трения на дорожке катания внутренней рельсовой нити (вариант 3). С увеличением радиусов кривых (от 600 до 800 м) боковые силы снижаются на 5 %. Применение лубрикации в кривых $R > 1 000$ м с целью снижения боковых сил не имеет эффективности.

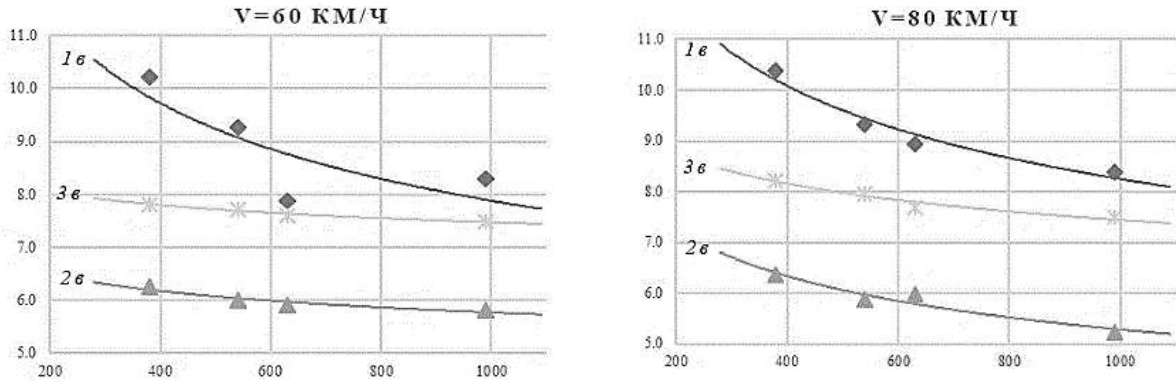


Рис. 1. Зависимость продольных сил от скорости, радиуса и трибологического состояния рельсов:
 1 в – сухое состояние рельсовых нитей; 2 в – уменьшение коэффициента трения
 на дорожке катания наружной рельсовой нити; 3 в – уменьшение коэффициента трения
 на дорожке катания внутренней рельсовой нити

Fig. 1. Dependence of the longitudinal forces on the speed, radius, and tribological state of the rails:
 1 в – dry state of rail threads; 2 в – reduction of a friction coefficient on the skating track of the outer rail thread; 3 в
 – reduction of a friction coefficient on the skating track of the inner rail thread

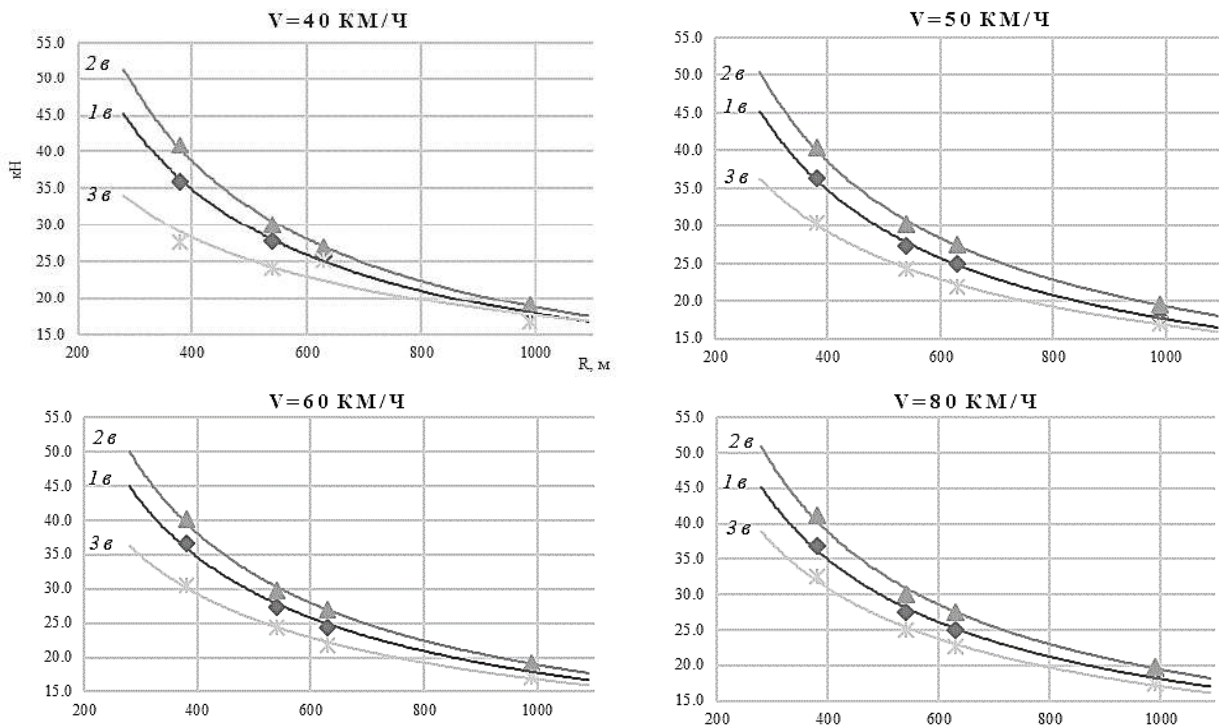


Рис. 2. Зависимость боковых сил от скорости, радиуса и трибологического состояния рельсов:
 1 в – сухое состояние рельсовых нитей; 2 в – уменьшение коэффициента трения
 на дорожке катания наружной рельсовой нити; 3 в – уменьшение коэффициента трения
 на дорожке катания внутренней рельсовой нити

Fig. 2. Dependence of the lateral forces on the speed, radius, and tribological state of the rails:
 1 в – dry state of rail threads; 2 в – reduction of a friction coefficient on the skating track of the outer rail thread; 3 в
 – reduction of a friction coefficient on the skating track of the inner rail thread

Полученные результаты зависимости боковых сил от радиуса при лубрикации на дорожке катания наружной рельсовой нити (вариант 2) показали увеличение сил относительно сухого состояния рельсов. На 11 % вырастают боковые силы в кривых радиусом менее 600 м. Эффективное снижение (до 23 %) при скорости 40 км/ч получено при снижении коэффициента трения на дорожке катания внутренней рельсовой нити (вариант 3). С увеличением радиусов кривых (от 600 до 800 м) боковые силы снижаются на 5 %. Применение лубрикации в кривых $R > 1000$ м с целью снижения боковых сил не имеет эффективности.

Оценка влияния управлением трения на безопасность движения

Основной критерий обеспечения безопасности движения – длина тормозного пути с начала торможения до полной остановки состава.

Применение лубрикации способно увеличить длину тормозного пути, что может спровоцировать аварийную ситуацию. Целью расчета служит определение разницы в длинах тормозного пути состава при рассматриваемых вариантах трибологического состояния рельсовой колеи. Выбран метод численного интегрирования по интервалам времени [15].

Для определения тормозного пути необходимо рассчитать сопротивление движению подвижного состава ω_0 . Согласно ПТР, сопротивление зависит от скорости движения и веса подвижного состава, коэффициент трения в контакте «колесо – рельс» не учитывается. Проведено моделирование в программном комплексе «Универсальный механизм» и получены значения сил в межвагонном пространстве, возникающих в автосцепке между тяговым модулем и первым грузовым вагоном, численно равным сопротивлению, возникающему при равномерном движении состава [16].

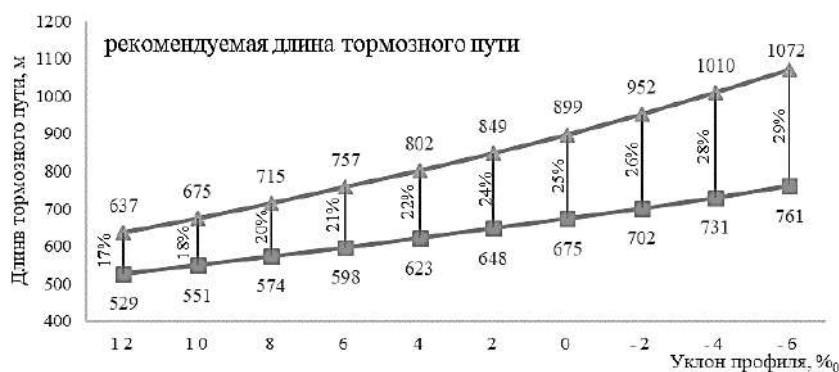


Рис. 3. Расчетное увеличение длины тормозного пути лубрикации дорожек катания обеих нитей относительно сухого трибологического состояния

Fig. 3. Calculated increase in the length of the braking distance of the lubrication of the skating tracks of both threads, relative to the dry tribological state

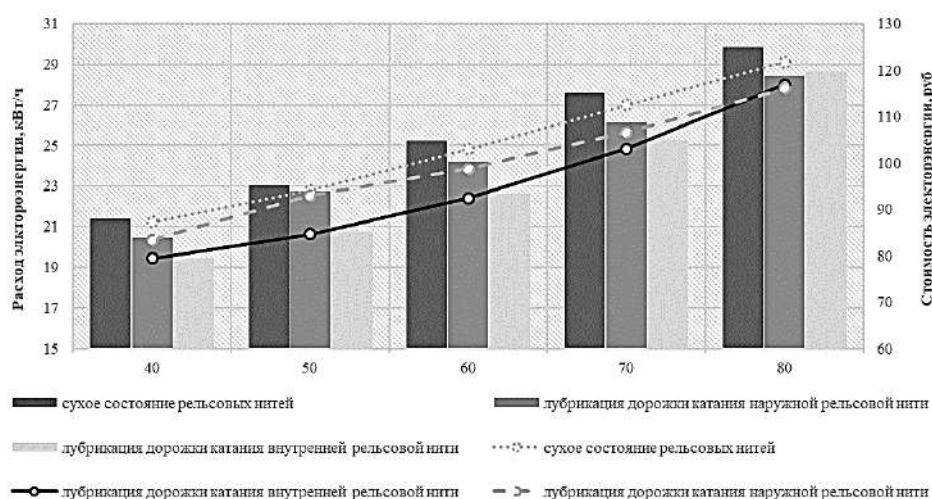


Рис. 4. Расход и стоимость топливно-энергетических ресурсов на 1 км пути при вариантах управления трением

Fig. 4. Consumption and costs of fuel and energy resources per 1 km under different variants of friction management

Выполнен расчет длины тормозного пути состава по формулам для уклонов пути от –10 до 10 %. Результаты представлены на рис. 3.

Полученные результаты дают возможность говорить об изменении коэффициента трения на дорожках катания рельсовых нитей, которое приводит к увеличению длины тормозного пути при самом неблагоприятном уклоне, т. е. на спуске, равном 10 %, на 20 м, что составляет 2 %. Это безопасное управление трением.

Технико-экономическое обоснование управления трением

Приоритетом ОАО «РЖД» является оптимизация расходов с помощью применения ресурсосберегающих технологий, позволяющих снижать сопротивление движению поездов и, как следствие снижение энергоресурсов на тягу поездов [16].

Согласно «Методике оценки энергоэффективности применения лубрикации зоны контакта «колесо – рельс»» проведено сравнение расчетных величин расходов топливно-энергетических затрат без применения и с при-

менением лубрикации [18]. Стоимость топливно-энергетических затрат на 1 км пути рассчитана исходя из стоимости 1 кВт/час (4,08 руб.) на 2020 г. для Свердловской области (рис. 4).

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что затраты на топливно-энергетические ресурсы снижаются:

– при лубрикации дорожки катания наружной рельсовой нити на 4 % при $V = 50$ км/ч и до 5 % при остальных скоростях движения;

– при смазывании дорожки катания внутреннего рельса на 10 % при скорости до 60 км/ч и на 4 % при скорости 80 км/ч/

Заключение

Проведенный анализ показывает, что управление коэффициентом трения на дорожке катания внутренней нити снижает продольные силы до 27 %, боковые силы на 23 %, тем самым способствуя повышению стабильности железнодорожного пути и снижению затрат на топливно-энергетические ресурсы и не влияет на безопасность и бесперебойность движения поездов.

Список литературы

1. Концепция развития лубрикации в системе «колесо – рельс». ОАО «РЖД». М.: 2008. 75 с.
2. Kumar S. Railway Track & Structures. 2009. No 5, p. 35–38.
3. Эффективность лубрикации рельсов // Железные дороги мира. 2011. № 1. С. 65–68.
4. UM. Электрон. журн. Лаборатория вычислительной механики, 2019. URL: <http://www.umlalab.ru/pages/index.php?id=1>.
5. Iwnicki Simon D. The Manchester benchmarks for rail vehicle simulation. Lisse: Swets & Zeitlinger, 1999.
6. Ромен Ю.С. Факторы, обуславливающие процессы взаимодействия в системе «колесо – рельс» при движении поезда в кривых // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 1. С. 17–25.
7. Ромен Ю.С., Суслов О.А., Баляева А.А. Определение сил взаимодействия в системе «колесо – рельс» на основании измерений напряжений в шейке рельса // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 6. С. 354–361.
8. Моделирование динамики железнодорожных экипажей (Руководство пользователя «Универсальный механизм 8»). 2016. URL: <http://www.umlalab.ru/pages/index.php?id=1>.
9. Калкер И.И., де Патер А.Д. Обзор теории локального скольжения в области упругого контакта с сухим трением // Прикладная механика. 1971. Т. 7. № 5. С. 9–20.
10. Kalker Y.Y. Uber die Mechanik des Kontaktes zwischen Rad und Schiene // Zev Glasers Annalen. 1978. Vol. 102. № 7/8. pp. 214–218.
11. Захаров С.М., Жаров И.А., Комаровский И.А. Трибологические аспекты взаимодействия колеса и рельса // Проблемы взаимодействия колеса и рельса. М.: 1999. Т. 1. С. 221–228.
12. Парахненко И.Л., Аккерман С.Г. Эффективность управления трением в контакте «колесо – рельс» // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 58–61.
13. Парахненко И.Л. Анализ сил взаимодействия в контакте «колесо – рельс» при различных трибологических вариантах. Транспорт Урала. 2019. № 2 (61). С. 54–57.
14. Парахненко И.Л., Аккерман С.Г. Исследование влияния вариантов лубрикации на силы, возникающие в контакте «колесо – рельс» // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (Рилттранс-2019): сборник трудов Третьей междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1 Развитие транспортной инфраструктуры и управление перевозками. ПГУПС, 2020. С. 367–382.
15. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985. 287 с.
16. Парахненко И.Л. Влияние лубрикации на безопасность движения грузовых поездов // Инновационный транспорт. 2020. № 1(35). С. 43–45.
17. Методические рекомендации по расчету экономического эффекта внедрения научно-технических достижений и передового опыта на железных дорогах – филиалах ОАО «РЖД». Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» 21.09.2005. № 1392р.
18. Методика оценки энергоэффективности применения лубрикации зоны контакта «колесо – рельс». Утв. распоряжением ОАО «РЖД» 09.10.2012 № 1998р.

References

1. Kontseptsiya razvitiya lubrikatsii v sisteme «koleso – rel's» [The concept of lubrication development in the «wheel – rail» system]. Moscow: OAO RZHD Publ. 2008. 75 p.
2. Kumar S. Railway Track & Structures, 2009, No. 5, pp. 35–38.
3. Effektivnost' lubrikatsii rel'sov [Efficiency of rail lubrication]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world], 2011, No. 1, pp. 65–68.
4. UM. Laboratory of Computational Mechanics, 2019. URL: <http://www.umlab.ru/pages/index.php?id=1>.
5. Iwnicki, Simon D. The Manchester benchmarks for rail vehicle simulation. Lisse: Swets & Zeitlinger, 1999.
6. Romen Yu. S. Faktory, obuslavlivayushhie protsessy vzaimodejstviya v sisteme «koleso – rel's» pri dvizhenii poezda v krivykh [Factors that determine the processes of interaction in the wheel – rail system when moving a train in curves]. *Vestnik VNIIZHT* [Bulletin of VNIIZHT], 2015, No. 1, pp. 17–25.
7. Romen, Yu.S., Suslov, O.A., Balyaeva, A.A. Opredelenie sil vzaimodejstviya v sisteme «koleso – rel's» na osnovanii izmerenij napryazhenij v shejke rel'sa [Determination of interaction forces in the wheel-rail system on the basis of stress measurements in the rail neck]. *Vestnik VNIIZHT* [Bulletin of VNIIZHT], 2017, Vol. 76, No. 6, pp. 354–361.
8. Modelirovanie dinamiki zheleznodorozhnykh ehkipazhej (Rukovodstvo pol'zovatelya «Universal'nyj mekhanizm 8») [Modeling the dynamics of railway crews (User's guide «Universal mechanism 8»)]. 2016. URL: <http://www.umlab.ru/pages/index.php?id=1>.
9. Kalker I.I. de Pater A.D. Obzor teorii lokal'nogo skol'zheniya v oblasti uprugogo kontakta s sukhim treniem [Review of the theory of local sliding in the field of elastic contact with dry friction]. *Prikladnaya mekhanika* [Applied Mechanics], 1971, Vol. 7, No. 5, pp. 9–20.
10. Kalker Y.Y. Uber die Mechanik des Kontaktes zwischen Rad und Schiene. *Zev Glasers Annalen*, 1978, Vol. 102, No. 7/8. pp. 214–218.
11. Zakharov S.M. Zharov I.A., Komarovskiy I.A. Tribologicheskie aspekty vzaimodejstviya kolesa i rel'sa [Tribological aspects of the interaction between wheel and rail]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj konferentsii assotsiatsii tyazhelovesnogo dvizheniya «Problemy vzaimodejstviya kolesa i rel'sa»* [Proceedings of the International conference of the Association of heavy-weight traffic «Problems of interaction of a wheel and a rail»]. Moscow, 1999, Vol. 1, pp. 221–228.
12. Parakhnenko I.L., Akkerman S.G. Effektivnost' upravleniya treniem v kontakte «koleso – rel's» [Efficiency of friction control in the contact «wheel – rail»]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2014, No. 2(41), pp. 58–61.
13. Parakhnenko I.L. Analiz sil vzaimodejstviya v kontakte «koleso-rel's» pri razlichnykh tribologicheskikh variantakh [Analysis of interaction forces in the «wheel-rail» contact under various tribological variations]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2019, No. 2(61), pp. 54–57.
14. Parakhnenko I.L., Akkerman, S.G. Issledovanie vliyaniya variantov lubrikatsii na sily, voznikayushhie v kontakte «koleso – rel's» [Research of the influence of lubrication variants on the forces arising in the «wheel – rail» contact]. *Razvitie infrastruktury i logicheskikh tekhnologii v transport sistemakh (Riltrans-2019): sbornik trudov tret'ej mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Chast' I Razvitie transportnoj infrastruktury i upravlenie perevozkami* [Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems: proceedings of the Third International scientific-practical conference. Part I Transport infrastructure development and transport management], 2020, pp. 367–382.
15. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoj raboty [Rules of traction calculations for train work]. Moscow: Transport Publ., 1985. 287 p.
16. Parakhnenko I.L. Vliyanie lubrikatsii na bezopasnost' dvizheniya gruzovykh poezdov [The influence of lubrication on the safety of freight train traffic]. *Innovatsionny transport* [Innovational transport], 2020, No. 1(35), pp. 43–45.
17. Metodicheskie rekomendatsii po raschetu ehkonomicheskogo ehffekta vnedreniya nauchno-tekhnicheskikh dostizhenij i peredovogo opyta na zheleznykh dorogakh – filialakh OAO «RZHD» [Methodological recommendations for calculating the economic effect of the introduction of scientific and technical achievements and best practices on the railways-branches of JSC «Russian Railways»]. Order of JSC «Russian Railways» 21.09.2005. No. 1392r.
18. Metodika otsenki ehnergoehffektivnosti primeneniya lubrikatsii zony kontakta «koleso – rel's» [Methodology for assessing the energy efficiency of the application of the wheel – rail contact zone lubrication]. Approved by JSC «Russian Railways» 09.10.2012. No. 1998r.

Информация об авторах

Парахненко Инна Леонидовна – старший преподаватель кафедры пути и железнодорожного строительства, Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, e-mail: iparahnenko@usurt.ru

Information about the authors

Inna L. Parakhnenko – Assistant professor of the Subdepartment Road and railway construction, Ural State Transport University, Yekaterinburg, e-mail: iparahnenko@usurt.ru

Применение принципов системного моделирования для построения прогнозных моделей вагонопотоков

Е. В. Маловецкая✉

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

✉ Malovetskaya_EV@irgups.ru

Резюме

Возможность прогнозирования неравномерности вагонопотоков и погрузки с установлением соответствующих показателей неравномерности – ключевой вопрос в ритмичности работы транспорта. При оценке сезонной неравномерности перевозок с помощью традиционных методик возникают существенные ошибки. В качестве одного из путей решения данной проблемы авторы предлагают усовершенствованный методический инструментарий оценки сезонной неравномерности вагонопотоков, а также погрузки грузов в адрес портов Дальнего Востока. Данная методика основана на построении модели прогноза вагонопотоков, сдаваемых по стыковым пунктам железных дорог и движущихся далее в направлении морских портов с последующим построением математической модели погрузки грузов, на основе которой в последующем можно будет спрогнозировать погрузку на предстоящий год. В представленной работе рассмотрена идентификация моделей временного ряда колебаний вагонопотоков и предложены модели для последующего построения прогноза, а также применен системный подход к решению проблемы прогнозирования объемов вагонопотоков. Необходимо отметить, что на сегодняшний день особо актуальны поставлены вопросы о разработке пошаговой инструкции по принятию решений по оперативной корректировке плана формирования диспетчерским аппаратом станций и региональных дирекций с перечнем порядка действий по выработке предложений и их согласованию. Предложенный инструментарий позволяет разработать модели прогноза для оценки сезонной неравномерности погрузки грузов в направлении морских портов. Все это будет способствовать повышению качества планирования и анализа функционирования и развития железных дорог. Весь спектр мероприятий состоит в возможности построения прогнозных моделей для производственного блока холдинга «РЖД», помимо этого появится возможность актуализации структуры эксплуатационных показателей сети.

Ключевые слова

математическая модель, моделирование погрузки, системный подход, сценарное прогнозирование, неравномерность вагонопотоков, прогнозирование погрузки, прогнозный анализ, модель прогноза

Для цитирования

Маловецкая Е. В. Применение принципов системного моделирования для построения прогнозных моделей вагонопотоков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 171–178. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).171-178

Информация о статье

поступила в редакцию: 03.09.2021, поступила после рецензирования: 10.09.2021, принята к публикации: 12.10.2021

Application of system modeling principles for the construction of forecast models of car traffic

Е. В. Malovetskaya✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ Malovetskaya_EV@irgups.ru

Abstract

The study of intra-annual dynamics of generalized indicators of railway production activity is an essential part of long-term forecasting, planning and analysis. The development of indicators of uneven operation of the car fleet is one of the important issues of solving the General problem of increasing the rhythmicity of operational work of railway transport. The use of conventional methods for the evaluation of seasonal variations of transportation causes a significant error. As one of the ways to solve this problem, the authors propose an improved methodological tool for assessing the seasonal unevenness of car flow and cargo loading for the ports of the Far East. This method is based on the construction of a car flow forecast mathematical model for cargo loading at the joint points of railways and heading on to the sea ports based on which loading is predicted for the upcoming year. In this work, the principles of mathematical modeling are presented for car flow fluctuations with the application of a systematic approach to solving the problem of predicting the volume of car traffic. It has to be noted that nowadays urgent is the issue of working out a step-by-step instruction for making decisions about fast corrections in the stations' formaton plans by dispatch staff and regional directorates with the course of actions for the proposals to be made and approved. By means of scenario planning and expert forecasting, the results were adjusted and the conclusion was made about the need to develop throughput capacities in the busiest sections of the BAM and TRANS-Siberian railway. A comparison of the actual

loading volumes with the predicted values showed that the presented forecast was justified. Deviations of forecast values from real ones are within acceptable limits. The proposed tools can significantly increase the accuracy of estimating seasonal unevenness of cargo loading and forecast the arrival of car traffic to seaports. All this will contribute to improve the quality of planning and analysis of the functioning and development of railways. The full range of measures includes the construction of process models of the production unit of the Russian Railways holding and the preparation of a forecast model of production activity, and can also contribute to the creation of an innovative system of operational indicators of polygons.

Keywords

mathematical model, loading simulation, system approach, scenario forecasting, uneven car traffic, loading forecasting, predictive analysis, forecast model

For citation

Malovetskaya E. V. Primenenie printsipov sistemnogo modelirovaniya dlya postroeniya prognoznykh modelej vagonopotokov [Application of system modeling principles for the construction of forecast models of car traffic]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 171–178. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).171-178

Article Info

Received: 03.09.2021, Revised: 10.09.2021, Accepted: 12.10.2021

Введение

Вопросы транзитности вагонопотоков с каждым годом не теряют своей актуальности, особенно с момента перехода инвентарного парка вагонов в частный. Все это требует введения новых инновационных методов прогнозирования с возможностью построения прогноза на годовой период, месяц, сутки и т. д. При этом необходимо уменьшить влияние человеческого фактора на точность принятия управленческих решений.

В существующих условиях развития информационного общества проблема принятия качественных решений среди предложенных альтернатив является одной из приоритетных, поскольку обусловлена значительной семантической нагрузкой для лиц, принимающих решения, так как моделируемые процессы сложно структурированного анализа связаны со многими аспектами управленческой деятельности: анализ, управление, планирование, распределение, рефлексия и др. [1]. Исходя из этого управленческое решение – это форма трудоемкой мыслительной деятельности, направленной на установление программы для последующих действий группы экспертов на основе требований, целей и новых задач с использованием анализа данных и информации.

Прогнозирование объемов вагонопотоков и, как следствие, объемов погрузки, приведет к системному контролю качества принимаемых решений на основе качественной информации, получаемой из прогнозных систем. Поскольку предусматривается дальнейший рост объемов погрузки в порты Дальнего Востока с увеличением грузопотока по Транссибу и БАМу в перспективе до 2030 г. [2], прогноз объема вагонопотока и погрузки является весьма актуальным.

Постановка задачи

Рассмотрим более детально процесс сдачи груженых вагонов по пунктам стыкования железных

дорог с дальнейшим продвижением вагонопотока в порты Дальнего Востока. Процесс приема и сдачи вагонопотоков и поездопотоков по пунктам стыкования железных дорог (ж/д) по сути своей является временной последовательностью по возрастанию моментов сдачи груженых вагонов [3]. При рассмотрении данного процесса с таких позиций, он будет являться точечным. Каждый момент поступления или сдачи вагонов по стыковому пункту своей природе является случайным [4]. Поэтому процессы сдачи и приема поездопотоков по стыкам – точечные случайные процессы.

Процессы работы вагонного парка, поступающего на стыковые пункты, являются случайными процессами. Нас интересует их протекание в течение расчетного периода.

Особый интерес представляют железнодорожные стыковые пункты, расположенные в границах Восточного полигона, самого передового на сети дорог РФ и имеющего выходы к морским портам Дальнего Востока. В связи с этим были проанализированы данные о вагонопотоках, поступающих на прием и сдачу на междорожные стыковые пункты на Дальневосточной ж/д – стык Архара, Забайкальской ж/д – стык Петровский завод, Восточно-Сибирской ж/д – стык Тайшет, Красноярской ж/д – стык Мариинск.

Для правильного выбора модели прогноза необходимо провести исследование временных рядов и установить, какими именно являются исследуемые ряды: стационарными или с содержанием стохастического тренда.

После того, как установлена зависящая связь между исследуемыми наблюдениями, приступают к подбору модели прогноза.

Моделирование сезонной волны выполняется на основе построения аналитической зависимости сезонных колебаний с использованием имитационной модели. Построение аналитической модели вы-

являет основной закон колеблемости данного временного ряда [5].

Аналитико-имитационные модели включают комбинированное представление ранее выделенных моделей математического моделирования [6].

Существенным моментом при построении модели прогноза является то, что параметры и характеристики транспортного процесса изменяются во времени, причем это изменение – случайный процесс. Методы оценки разброса характеристик процесса применяются к выборке значений, которые принимает наблюдаемая характеристика вне зависимости от времени их появления [7].

Большое значение имеют математические методы анализа динамических (временных) рядов. Главная задача математического анализа динамических рядов показателей транспорта – определение изменений, происходящих в данном явлении и вычисление направления, скорости и интенсивности этого изменения, т. е. сжатое описание характерных особенностей ряда [8].

Временные ряды транспортных процессов на железнодорожном транспорте, которым присущи сезонные колебания, можно представить в виде следующей аддитивной модели:

$$y_t = f(x_t) + z_t + w_t + \gamma_t$$

либо мультипликативной модели

$$y_t = f(x_t) \cdot z_t \cdot w_t \cdot \gamma_t,$$

где $f(x_t)$ – основная тенденция (тренд) развития показателя; w_t – циклические колебания; z_t – внутригодовые колебания (сезонные волны); γ_t – случайная компонента, характеризующая отклонение индивидуальных значений показателя от тренда и имеющая вероятностный характер.

Величину γ_t точно определить нельзя. Можно только с определенной вероятностью утверждать, что вычисленные по детерминированной зависимости оценки [9] показателей будут отличаться от истинной на величину

$$\gamma_t = t \cdot \sigma_t / \sqrt{n},$$

где t – число отклонения средней величины от своего отклонения при определенной вероятности (коэффициент доверия); σ_t – среднее квадратичное отклонение случайной величины γ_t .

Начальный этап составления модели прогноза предполагает изучение факторов дальнего окружения. Основная задача анализа факторов – создание информативной компоненты для последующей разработки стратегии.

Достаточно точно воздействие факторов дальнего окружения оценивается с помощью PEST-анализа. Так как PEST-анализ затрагивает внешние факторы, влияющие на работу отрасли [10], деление внешней среды производится по определенной схеме. В ней выделяются:

– макросреда (правительство, экономические события, социально-демографические факторы и

отношения, научно-технический прогресс и факторы, зависящие от природы);

– микросреда (поставщики, акционеры, покупатель, кредиторы, профсоюзы, конкуренты).

Далее, на основе драйверов, был использован метод сценарного прогнозирования.

Метод сценарного прогнозирования дает возможность определить вероятные тенденции развития событий и возможные последствия принимаемых решений с целью выбора наиболее подходящей альтернативы управления [11, 12].

Данный метод предполагает задействование в работе над сценариями прогнозируемой ситуации специалистов разного профиля с диаметрально противоположными взглядами на анализируемую ситуацию.

Сценарий по своему описанию является фундаментом для исходной информации, с опорой на который строится дальнейшая работа по прогнозированию развития ситуации [13–15], в связи с чем любой сценарий в готовом виде должен быть тщательно проанализирован.

Поэтому по итогам построения сценариев было проведено экспертное прогнозирование.

Выводы

На первоначальном этапе составления модели прогноза был осуществлен анализ факторов дальнего и ближнего окружения с определением их влияния (табл. 1).

Для определения факторов ближнего и дальнего окружения, которые могут оказывать влияние на объемы перевозимых грузов в (из) порты Дальнего Востока по дорогам Восточного полигона, были проанализированы фактические объемы перевалки грузов в портах с их разбивкой по видам грузов, основным грузоотправителям и конечным странам получателям.

В качестве факторов дальнего и ближнего окружения были предложены:

– тарифная политика, формируемая Правительством РФ в отношении ОАО «РЖД»;

– спрос на энергоресурсы в странах Юго-Восточной Азии и Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР);

– долгосрочные прогнозы Международного энергетического агентства;

– прогнозы по расширению провозных способностей магистральной (БАМа и Транссиба) и портовой инфраструктуры;

– перспективы развития парка локомотивов и вагонов для освоения требуемых грузопотоков;

– перспективы разработки новых месторождений полезных ископаемых в РФ;

– конкуренция со стороны трубопроводного транспорта (для доставки газа и нефти в страны АТР).

На основе вероятности возникновения и степени влияния для перевозок по железным дорогам Восточного полигона определены два драйвера [16–18], оказывающее наибольшее влияние на формирование грузовой базы:

1. Увеличение ежегодного спроса на российский уголь в Индии и Южной Корее на 4 % к 2027 г.;

2. Строительство железной дороги общего пользования Элегест – Кызыл – Курагино к 2025 г.

По итогам сценарного планирования [19], была проведена очистка ряда от сезонной компоненты и найдена функция тренда (рис. 1).



Рис. 1. Очищенный ряд от сезонности и функция тренда

Fig. 1. Cleared series from seasonality and trend function

Извлечение сезонности [20, 21] будет осуществляться методом центрированной скользящей средней, так как величина погрузки вагонов в порты Дальнего Востока имеет явный тренд на возрастание

[22, 23]. Так как для извлечения сезонности необходимы данные за парное число лет, был взят период 2015–2018 гг. Полученная модель представлена на рис. 2.



Рис. 2. Фактические значения и модель (в том числе прогноз на 2019 г.)

Fig. 2. Actual data and model (including forecast for 2019)

Выполнена корректировка результатов прогнозирования на основе экспертных данных [24, 25]. Эксперты выбраны из числа руководителей дирекции управления движением. Каждому из экспертов определен вес на основе опыта работы в сфере грузовых перевозок, общей информированности о предмете исследования, личной самооценки.

Экспертами для каждого из сценариев даны прогнозные величины изменения погрузки грузов в направлении портов Дальнего Востока.

Для каждого из сценариев на основе экспертного прогноза определены средневзвешенные величины изменения погрузки на период до 2023 и 2025 гг. (табл. 2, 3).

По результатам сценарного планирования и стратегического прогнозирования следуют выводы о

Таблица 1. Анализ факторов дальнего окружения (PEST-анализ)

Table 1. Analysis of distant environment factors (PEST Analysis)

Фактор	Позитив / негатив	Вероятность	Значимость	Итоговое влияние
Сохранение стоимости транзитных контейнерных перевозок до 2023 г. (2 700 долл. за 40-футовый контейнер) на основе индекса ERAI (Eurasian Rail Alliance Index)	–	0,6	0,2	0,12
Прогноз по стоимости сжиженного природного газа в перспективе до 2025 г. на уровне 10,5 долл. / МБТЕ	+	0,3	0,8	0,24
Рост стоимости транзитных морских контейнерных перевозок на направлении Азия – Европа к 2025 г. по индексу WCI Drewry до 1 900 долл. за 40-футовый контейнер	+	0,7	0,5	0,35
Рост уровня экономики КНР до 2025 г. на уровне 6,3–6,4 % ежегодно	+	0,7	0,7	0,49
Снижение индекса мировых цен на уголь до 2022 г. до уровня 80 долл. за тонну	+	0,8	0,6	0,48
Увеличение спроса на энергетический уголь в Индии и Южной Корее на 4 % ежегодно до 2027 г.*	+	0,8	0,9	0,72
Увеличение спроса на энергетический уголь в Юго-Восточной Азии на 3,5 % ежегодно до 2027 г.	+	0,8	0,8	0,64

* Главный фактор, являющийся основным драйвером.

Таблица 2. Экспертный прогноз по изменению погрузки в порты до 2023 г., млн т
Table 2. Expert forecast for change of loading to ports 2023, mln tons

Эксперт	Вес	Сценарий			
		1	2	3	4
1	0,875	22	8	5	14
2	0,925	18	8	4	11
3	0,675	23	12	0	10
4	0,725	25	11	6	16
Прогноз	3,2	21,73	9,52	3,06	12,74

Таблица 3. Экспертный прогноз по изменению погрузки в порты до 2025 г., млн т
Table 3. Expert forecast for change of loading to ports 2025, mln tons

Эксперт	Вес	Сценарий			
		1	2	3	4
1	0,875	25	8	3	15
2	0,925	20	10	5	13
3	0,675	24	12	1	12
4	0,725	26	12	6	17
Прогноз	3,2	23,57	10,33	3,84	14,24

Таблица 4. Корректировка результатов прогнозирования на основе экспертных данных
Table 4. Correction of forecast results based on expert data

Год	Месяц	Прогноз по погрузке, млн т	Причина корректировки	Изменение	Суммарное влияние	Погрузка с корректировкой, млн т
2019	1	134 404	Без корректировки	0 %	0 %	134 404
	2	125 498		0 %	0 %	125 498
	3	145 229		0 %	0 %	145 229
	4	138 571	Сокращение импорта Китая энергетического угля на 2 % со второго квартала 2019 г.	-2 %	-2 %	135 800
	5	140 531		-2 %	-2 %	137 721
	6	139 225		-2 %	-2 %	136 440
	7	141 378		-2 %	-2 %	138 551
	8	139 865	-2 %	-2 %	137 068	
	9	128 863	Завершение строительства второго байкальского тоннеля	8 %	6 %	136 594
	10	136 138		8 %	6 %	144 306
	11	134 938		8 %	6 %	143 034
	12	137 721		8 %	6 %	145 984

необходимости развития пропускных способностей на наиболее загруженных участках. В среднесрочной перспективе это будет ограничивающим фактором в увеличении объемов погрузки в направлении портов Дальнего Востока, в противном случае есть риск не освоить всего объема перевозимых грузов и недополучить прибыль [13].

Выполнена корректировка результатов прогнозирования на основе экспертных данных (табл. 4).

Модель, построенная методом тренда и сезонности, оказалась достаточно точной с наименьшим значением среднеквадратического отклонения. Суммарная погрузка вагонов в порты Дальнего Востока по результатам прогнозирования (на основе модели) составила в 2019 г. 1 642 360 вагонов. Увеличение к уровню 2018 г. – 2 %.

Заключение

По итогам 2019 г., сравнивая реальные объемы погрузки в адрес портов Дальнего Востока, следует вывод, что представленный прогноз оправдался. Отклонения прогнозных значений от реальных находятся в допустимых границах.

Данная модель прогнозирования может быть внедрена в производственный цикл в целях автоматизации процесса прогнозирования объемов погрузки грузов железнодорожным транспортом, осуществляемого центром фирменного транспортного обслуживания в рамках планирования объемов работ и потребности в ресурсах филиалов ОАО «РЖД» на год, квартал, месяц.

Список литературы

1. Бабина О.И. Сравнительный анализ имитационных и аналитических моделей // Имитационное моделирование. Теория и практика : Четвертая Всерос. конф. по имитацион. моделированию и его применению в науке и промышленности. СПб. : Центр технологии судостроения и судоремонта. 2009. С. 73–77.
2. Бурда А.Г., Бурда Г.П. Экономико-математические методы и модели. Краснодар : Кубан. гос. аграр. ун-т., 2015. 178 с.
3. Доклад генерального директора – председателя правления открытого акционерного общества «Российские железные дороги» О.В. Белозерова на расширенном итоговом заседании правления ОАО РЖД // Железнодорожный транспорт. 2018. № 1. С. 4–10.
4. Шаров В.А. Новые риски при реализации единого интегрированного планирования на железнодорожном транспорте общего пользования // Наука и техника транспорта. 2016. № 2. С. 87–93.
5. Набатова Д.С. Математические и инструментальные методы поддержки принятия решений. М. : Юрайт, 2019. 292 с.
6. Маловецкая Е.В. Актуализация порядка расчета плана формирования поездов и уточнения перечня показателей эксплуатационной работы на основе имитационного моделирования с учетом развития полигонных технологий // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 1 (53). С. 184–188.
7. Маловецкая Е.В., Козловский А.П. Актуальность применения математического моделирования при построении прогнозных моделей погрузки грузов в адрес портов Дальнего Востока // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 12. С. 51–57. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-12-51-57.
8. Мачерет Д.А., Ледней А.Ю. Объемы перевозок – ключевой фактор эффективности развития транспортной инфраструктуры // Экономика железных дорог. 2019. № 4. С. 28–38.
9. Волокобинский М.Ю., Пекарская О.А., Рази Д.А. Принятие решений на основе метода анализа иерархий // Вестник финансового университета. 2016. № 2 (92). С. 33–42.
10. Скроба М.В., Маловецкая Е.В. К вопросу об изменении длины гарантийных плеч участков // Инфраструктура и эксплуатация наземного транспорта : материалы междунар. студенч. науч.-практ. конф. Т.1. Нижний Новгород : Науч.-изд. центр «21 век», 2019. С. 255–258.
11. Волкова В.Н., Черненькая Л.В., Магер В.Е. Классификация моделей в системном анализе // Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 3 (174). С. 33–43.
12. Маловецкая Е.В., Большаков Р.С. Особенности применения временных рядов для оценки колебаний вагонопотоков по стыковым пунктам железных дорог // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 1. С. 35–40. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-1-35-40.
13. Звягин Л.С. Применение системно-аналитических методов в области экспертного прогнозирования // Экономика и управление: проблемы, решения. 2017. Т. 3. № 6. С. 145–148.
14. Planning of qualitative indexes of railroad operational work in polygon technologies / E.V. Malovetskaya, R.S. Bolshakov, A.V. Dimov et al. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 760 012041. DOI:10.1088/1757-899X/760/1/012041.
15. Иванкова Л.Н., Кузнецова Т.Г., Волкова С.Г. Определение потребного технического оснащения станции с учетом колебаний транспортных потоков // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. 2019. № 15. С. 3–8.
16. Аева М.А., Маловецкая Е.В. Система единого планирования для всех видов транспорта // Инфраструктура и эксплуатация наземного транспорта : материалы междунар. студенч. науч.-практ. конф. Т. 1. Нижний Новгород: Науч.-изд. центр «21 век», 2019. С. 11–16.
17. Погожих Н.И., Софронова М.С., Панасенко Д.П. Способ преобразования множества возможных решений в теории принятия решений // ScienceRise. 2017. №1 (41). С. 77–81.
18. Самотина С.А., Потапова Е.В. Принятие управленческих решений в условиях неопределенности // Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. 2011. № 1. С. 3–4.
19. Синчуков А.В. Современная классификация математических моделей // Инновационная наука. 2016. № 3-1. С. 214–215.
20. Сотников Е.А., Шенфельд К.П. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на потребную пропускную способность участков // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 5. С. 3–9.
21. Спиридонова Е.В. PEST – анализ, как главный инструмент анализа факторов дальнего окружения // Современные научные исследования и инновации. 2017. № 3. С. 400–405.
22. Grigoroudis E., Orfanoudaki E., Zopounidis C. Strategic performance measurement in a healthcare organisation: A multiple criteria approach based on balanced scorecard // Omega. 2012. № 40 (1). P. 104–119.
23. Sehra S.K., Brar D., Singh Y., Kaur D. “Multi criteria decision making approach for selecting effort estimation model // International Journal of Computer Applications. 2012. Vol. 39. №1, January. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1310/1310.5220.pdf>. (access date: 12.03.2021).
24. Sevcenko G. Statybos investicimq sprendimq rizikos valdymas : diss. VGTU leidykla «Technika», 2015. 186 p.
25. Valiris G., Chytas P., Glykas M. Making decisions using the balanced scorecard and the simple multi-attribute rating technique // Performance Measurement and Metric. 2005. DOI:10.1108/14678040510636720.

References

1. Babina O.I. Sravnitel'nyj analiz imitatsionnykh i analiticheskikh modelej [Comparative analysis of simulation and analytical models]. *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika: Chetvyortaya Vserossiyskaya konferentsiya po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti*. [Simulation modeling. Theory and practice: Fourth All-Russian Conference on Simulation and its Application in Science and Industry]. Saint Petersburg, 2009, pp. 73–77.

2. Burda A.G., Burda G.P. Ekonomiko-matematicheskie metody i modeli [Economic and mathematical methods and models]. Krasnodar: Kubanskiy gosudarstvenniy agrarniy universitet Publ., 2015. 178 p.
3. Doklad general'nogo direktora – predsedatelya pravleniya otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Rossijskie zheleznye dorogi» O.V. Belozerova na rasshirennoy itogovom zasedanii pravleniya OAO RZHD [Report of O.V. Belozerov, General Director - Chairman of the Board of the Russian Railways Open Joint Stock Company, at the expanded final meeting of the Board of Russian Railways]. *Zheleznodorozhnyy transport [Railway transport]*, 2018, No. 1, pp. 4–10.
4. Sharov V.A. Novye riski pri realizatsii edinogo integrirovannogo planirovaniya na zheleznodorozhnom transporte obshhego pol'zovaniya [New risks in the implementation of a single integrated planning on public rail]. *Nauka i tekhnika transporta [Science and technology of transport]*, 2016, No. 2, pp. 87–93.
5. Nabatova D.S. Matematicheskie i instrumental'nye metody podderzhki prinyatiya reshenij [Mathematical and instrumental methods for supporting decision-making]. Moscow: Yurajt Publ., 2019. 292 p.
6. Malovetskaya E.V. Aktualizatsiya poryadka rascheta plana formirovaniya poezdov i utochneniya perechnya pokazatelej ehkspluatatsionnoy raboty na osnove imitatsionnogo modelirovaniya s ucheto razvitiya poligonnykh tekhnologiy [Updating the procedure for calculating the train formation plan and refining the list of operational performance indicators based on simulation modeling taking into account the development of poly-racing technologies]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii [Modern knowledge-intensive technologies]*, 2019, No. 1(53), pp. 184–188.
7. Malovetskaya E.V., Kozlovskiy A.P. Aktual'nost' primeneniya matematicheskogo modelirovaniya pri postroenii prognoznnykh modelej pogruzki gruzov v adres portov Dal'nego Vostoka [Relevance of the application of mathematical modeling in the construction of forecast models of cargo loading to ports of the Far East]. *T-Comm – Telekommunikatsii i Transport [T-Comm: Telecommunications and transport]*, 2020, Vol. 14, No. 12, pp. 51–57. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-12-51-57.
8. Macheret D.A., Lednei A.Yu. Ob"emy perezovok – klyuchevoy faktor ehffektivnosti razvitiya transportnoy infrastruktury [Transportation volumes are a key factor in the efficiency of transport infrastructure development]. *Ekonomika zheleznykh dorog [Railway economics]*, 2019, No. 4, pp. 28–38.
9. Volokobinsky M.Yu., Pekarskaya O.A., Razi D.A. Prinyatie reshenij na osnove metoda analiza ierarkhiy [Decision-making based on the method of analyzing hierarchies]. *Vestnik finansovogo universiteta [Bulletin of the Financial University]*, 2016, No. 2(92), pp. 33–42.
10. Skroba M.V., Malovetskaya E.V. K voprosu ob izmenenii dliny garantnykh plech uchastkov [To the question of changing the length of the guarantee shoulders of the sections]. *Infrastruktura i ehkspluatatsiya nazemnogo transporta: materialy mezhdunarodnoy studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 2 chastyakh [Infrastructure and operation of land transport: materials of the international student scientific and practical conference: in 2 parts]*. Nizhny Novgorod, 2019, Vol. 1, pp. 255–258.
11. Volkova V.N., Chernenkaya L.V., Mager V.E. Klassifikatsiya modelej v sistemnom analize [Classification of models in system analysis]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie [Scientific and technical statements of St. Petersburg State Polytechnic University. In-format. Telecommunications. Management]*, 2013, No. 3(174), pp. 33–43.
12. Malovetskaya E.V., Bolshakov R.S. Osobennosti primeneniya vremennykh ryadov dlya otsenki kolebanij vagonopotokov po stykovym punktam zheleznykh dorog [Features of the use of time series for assessing the fluctuations of car flows at the junction points of railway roads]. *T-Comm – Telekommunikatsii i Transport [T-Comm: Telecommunications and transport]*, 2021, Vol. 15, No. 1, pp. 35–40. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-1-35-40.
13. Zvyagin L.S. Primenenie sistemno-analiticheskikh metodov v oblasti ehkspertnogo prognozirovaniya [Application of systems-analytical methods in the field of expert forecasting]. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya [Economics and management: problems, solutions]*, 2017, Vol. 3, No. 6, pp. 145–148.
14. Malovetskaya E.V., Bolshakov R.S., Dimov A.V., Byshlyago A.A. «Planning of qualitative indexes of railroad operational work in polygon technologies» et al 2020. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 760 012041.
15. Ivankova L.N., Kuznetsova T.G., Volkova S.G. Opredelenie potrebnogo tekhnicheskogo osnashheniya stantsii s ucheto kolebanij transportnykh potokov [Determination of the required technical equipment of the station taking into account fluctuations in traffic flows]. *Sovremennye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta [Modern problems of improving the operation of railway and non-road transport]*, 2019, No. 15, pp. 3–8.
16. Aeva M.A., Malovetskaya E.V. Sistema edinogo planirovaniya dlya vseh vidov transporta [Unified planning system for all modes of transport]. *Infrastruktura i ehkspluatatsiya nazemnogo transporta: materialy mezhdunarodnoy studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 2 chastyakh [Infrastructure and operation of land transport: materials of the international student scientific and practical conference: in 2 parts]*. Nizhny Novgorod, 2019, Vol. 1, pp. 11–16.
17. Pogozych N.I., Sofronova M.S., Panasenko D.P. Sposob preobrazovaniya mnozhestva vozmozhnykh reshenij v teorii prinyatiya reshenij [A way of transforming many possible decisions in decision theory]. *ScienceRise*, 2017, No. 1(41), pp. 77–81.
18. Samotina S.A., Potapova E.V. Prinyatie upravlencheskikh reshenij v usloviyakh neopredelennosti [Making managerial decisions in an uncertain environment]. *Innovatsionnaya ehkonomika: informatsiya, analitika, prognozy [Innovative economics: information, analytics, forecasts]*, 2011, No. 1, pp. 3–4.
19. Sinchukov A.V. Sovremennaya klassifikatsiya matematicheskikh modelej [Modern Classification of Mathematical Models]. *Innovatsionnaya nauka [Innovative Science]*, 2016, No. 3-1, pp. 214–215.
20. Sotnikov E.A., Schoenfel K.P. Neravnomenost' gruzovykh perezovok v sovremennykh usloviyakh i ee vliyanie na potrebnuyu propusknyuyu sposobnost' uchastkov [Uneven freight transportation in modern conditions and its impact on the required throughput of sections]. *Vestnik VNIIZHT [Bulletin VNIIZHT]*, 2011, No. 5, pp. 3–9.
21. Spiridonova E.V. PEST-analiz, kak glavnyy instrument analiza faktorov dal'nego okruzeniya [PEST-analysis as the main tool for the analysis of factors of the far environment]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii [Modern scientific research and innovation]*, 2017, No. 3, pp. 400–405.

22. Grigoroudis E., Orfanoudaki E., Zopounidis C. Strategic performance measurement in a healthcare organisation: A multiple criteria approach based on balanced scorecard. *Omega*, 2012, No. 40(1), pp. 104–119.
23. Sehra S.K., Brar D., Singh Y., Kaur D. Multi criteria decision making approach for selecting effort estimation model. arXiv preprint arXiv:1310.5220. 2013.
24. Sevcenko G. Statybos investicimq sprendimq rizikos valdymas: Diss. VGTU leidykla “Technika”. 2015. 186 p.
25. Valiris G., Chytas P., Glykas M. Making decisions using the balanced scorecard and the simple multi-attribute rating technique. *Performance Measurement and Metric*, 2005.

Информация об авторах

Маловецкая Екатерина Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Malovetskaya_EV@irgups.ru

Information about the authors

Ekaterina V. Malovetskaya – Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor of the Subdepartment Operational work management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Malovetskaya_EV@irgups.ru

Резервы повышения надежности коллекторных тяговых электродвигателей электровозов

А. М. Худоногов✉, В. Н. Иванов

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

✉ a.hudonogov@yandex.ru

Резюме

В статье проанализированы и приведены данные, предоставленные сервисными локомотивными депо Красноярского, Восточно-Сибирского и Забайкальского управлений «Локо-Тех» по заходам электровозов на межпоездной ремонт по итогам работы за 2020 г. Приняты во внимание наработки Омского государственного университета путей сообщения по отказам тяговых электродвигателей электровозов постоянного тока. Проведен предметный анализ отказов оборудования крупных сервисных локомотивных депо (Боготол, Нижнеудинск, Чита). Акцент сделан на пробой изоляции пальцев щеткодержателей тяговых электродвигателей. Исследованы действующая система ремонта изоляционных пальцев тяговых электродвигателей в условиях сервисных локомотивных депо, а также влияние твердости и эластичности высушенного пропиточного материала на надежность изоляционных конструкций при эксплуатации электрического оборудования тягового подвижного состава. Предложены варианты сокращения времени и финансовых затрат на процесс запекания поверхностного изоляционного слоя пальцев тяговых электродвигателей, при этом при практическом применении указанного варианта подтвердился положительный результат метода с применением инфракрасного излучения. В результате использования карусельного способа пропитки и сушки полимерной изоляции пальцев кронштейнов щеткодержателей тяговых электродвигателей инфракрасным излучением сокращаются в 2–3 раза расход энергии и не менее чем в 5–10 раз время на технологические операции по пропитке и сушке пальцев кронштейнов щеткодержателей. В качестве математических моделей для расчетов оптимальных режимов инфракрасного энергоподвода при таком конструктивном решении можно рекомендовать метод двойного преобразования тригонометрических рядов Фурье с постоянным периодом.

Ключевые слова

тяговый двигатель, электроизоляционный материал, твердость полимеров, механическая прочность, терморadiационная сушка, электрическая прочность, изоляционные пальцы, тяговый подвижной состав

Для цитирования

Худоногов А. М. Резервы повышения надежности коллекторных тяговых электродвигателей электровозов / А. М. Худоногов, В. Н. Иванов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 179–184. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).179-184

Информация о статье

поступила в редакцию: 05.09.2021, поступила после рецензирования: 15.09.2021, принята к публикации: 15.10.2021

Reserves for improving the reliability of collector traction electric motors of electric locomotives

A. M. Khudonogov✉, V. N. Ivanov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ a.hudonogov@yandex.ru

Abstract

The article analyzes and presents the data provided by the locomotive service depots of the Krasnoyarsk, East Siberian and Trans-Baikal management “Loco-Tech” on the calls of electric locomotives for inter-train repair according to the operation results for 2020. The developments of OmGUPS on the failure rate of traction electric motors of DC electric locomotives are taken into account. A substantive analysis of the equipment failure of large locomotive service depots (Bogotol, Nizhneudinsk, Chita) was carried out. The emphasis is placed on the insulation breakdown of the brush holder fingers of traction motors. The current repair system of insulating fingers of traction electric motors under the conditions of service locomotive depots is analyzed. The influence of the hardness and elasticity of the dried impregnating material upon the reliability of insulation structures during the operation of electric equipment of traction rolling stock is analyzed. Options for reducing the time and financial costs for the process of baking the surface insulation layer of traction electric motors' fingers are proposed, while the practical application of the above option confirmed the positive result of the use of infrared radiation method. Resulting from the application of the carousel impregnation method and drying of the polymer insulation of the fingers of the brush holder brackets of traction electric motors, infrared radiation reduces energy consumption by 2–3 times and at least 5–10 times the time for technological operations

for impregnation and drying of the fingers of the brush holder brackets. As mathematical models for calculating the optimal modes of infrared energy supply, with such a solution, the method of double transformation of trigonometric Fourier series with a constant period can be recommended.

Keywords

traction motor, electrical insulation material, polymer hardness, mechanical strength, thermal radiation drying, electrical strength, insulating fingers, traction rolling stock

For citation

Khudonogov A. M., Ivanov V. N. Rezervy povysheniya nadezhnosti kollektornykh tyagovykh elektrodvigatelei elektrovozov [Reserves for improving the reliability of collector traction electric motors of electric locomotives]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 179–184.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).179-184

Article info

Received: 05.09.2021, Revised: 15.09.2021, Accepted: 15.10.2021

Введение

В настоящее время на железных дорогах России грузовые и пассажирские перевозки осуществляются электровозами с коллекторными тяговыми двигателями (ТЭД). Один из основных недостатков этих электродвигателей – низкая надежность коллекторно-щеточного узла (КЩУ) [1–3].

По данным ученых ОмГУПС основными видами повреждений ТЭД, таких, например, как ТЛ-2К1, являются пробой изоляции и межвитковое замыкание (МВЗ) обмоток якоря – 28 %; круговой огонь с явно выраженным повреждением КЩУ – 16 %; пробой изоляции и МВЗ обмоток главных и дополнительных полюсов (ГП и ДП) и компенсационной обмотки (КО) – 9 %; повреждение якорных подшипников – 8 %; низкое сопротивление изоляции якорных и полюсных обмоток – 5 %.

При исследовании процесса коммутации коллекторных ТЭД учеными ОмГУПС была выдвинута гипотеза, что на процесс коммутации значительное влияние оказывает состояние изоляционных конструкций коллекторного ТЭД и особенно элементов КЩУ [2, 4–6].

Не лучше картина по надежности ТЭД наблюдается и на электровозах переменного тока.

В табл. приведены результаты заходов на межпоездной ремонт по причине неисправности ТЭД различных серий электровозов, эксплуатируемых на железных дорогах Восточного полигона (ВЛ80р, ВЛ85, ЗЭС5К «Ермак»). Наибольший процент по перекрытию и пробую изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей наблюдается у электровозов серий ВЛ85 и «Ермак», которые составляют основной парк грузовых электровозов Восточного полигона.

Существующая система ремонта изоляционных пальцев щеткодержателей тягового электродвигателя

На заводах по изготовлению и ремонту тягового подвижного состава, а также в сервисных локомотивных депо, технология изготовления и восстановления изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей ТЭД в операции сушки полимера рекомендует использовать мощные конвективные печи [7–10]. Иногда эти же печи применяют и в де-

Распределение отказов по группам тяговых электродвигателей при постановке на межпоездной ремонт по итогам 2020 г. на Восточном полигоне

Failure distribution over the groups of traction electric motors under the intertrain repair calls summarized for the year 2020 at Eastern poligon

Дирекция тяги / депо приписки	Тип тягового электродвигателя	Общее количество отказов	Главные полюса	Дополнительные полюса	Остов / кабели / клемная коробка	Якорь	Коллекторно-щеточный узел	Пробой пальцев	Процент к общему количеству отказов
Красноярская / Боготол	НБ-418кб	366	86	44	18	71	90	57	15
Восточно-Сибирская / Нижнеудинск	НБ-514	383	83	38	43	98	33	88	23
Забайкальская / Читя	НБ-514Б	280	36	34	38	78	38	56	20

по. И если на заводах в эти мощные печи можно загрузить большое количество изоляционных пальцев, то в депо в среднем количество отказов по пальцам за год в пределах 300 случаев.

Штатная технология по восстановлению диэлектрических пальцев в депо (на примере СЛД-74 Боготол-Сибирский) состоит из нескольких операций.

После разборки ТЭД траверса с пальцами передается на участок по ремонту данного узла. Затем, на специальном приспособлении, траверса разбирается и производится первичная дефектация элементов в том числе и изоляционных пальцев в соответствии с инструкцией ТИ 752.

Неотбракованные пальцы очищаются от старого покрытия на специальном станке с помощью наждачной бумаги (рис. 1).



Рис. 1. Станок для шлифовки электроизоляционных пальцев

Fig. 1. Electric Insulation Finger Grinding Machine

После шлифовки и очистки пальцев от старого покрытия они вворачиваются в специальные накопители (рис. 2).



Рис. 2. Накопители для пропитки и сушки изоляционных пальцев

Fig. 2. Storage devices for impregnation and drying of insulation fingers

После этого пальцы подвергаются сушке и нагреву до температуры 70 °С в специальной печи мощностью 25 кВт. Продолжительность нагрева составляет около 20 мин. По окончании нагрева производится окунание пальцев в ванну с лаком. Их выдерживают в лаке до исчезновения пузырей [7–9].

После окунания поднимают изоляционные пальцы из ванны и дают лишнему лаку сбежать. Резьба лаком не покрывается. Лак в основном марки ФЛ-98. Далее производится сушка пальцев. Сушат при температуре 130–140 °С в течение 5 ч. В это время пальцы располагаются вертикально, торцевой частью вниз. Контроль температуры осуществляется с помощью индикаторного табло. Внешний вид сушильного шкафа и емкости с лаком представлен на рис. 3.



Рис. 3. Сушильный шкаф с индикаторным табло (слева) и ванна с лаком ФЛ-98 (справа)

Fig. 3. A drying cabinet with an indicator board (left) and a bath with FL-98 varnish (right)

По окончании запекания лаковой пленки накопители с изоляционными пальцами извлекаются из сушильного шкафа и охлаждаются до температуры окружающего воздуха.

Затем проверяется электрическая прочность изоляции пальцев переменным током 50 Гц в течение 1 мин. напряжением 4,1 кВ. После испытания изоляционных пальцев на них наносится дата проверки и начальная буква фамилии исполнителя, производившего проверку на пробой изоляции.

При испытаниях на электрическую прочность изоляционных пальцев при штатной технологии порядка 15 % отремонтированной продукции пробивает в связи с некачественным состоянием изоляции и технологии ремонта.

Предлагаемые варианты повышения ресурса изоляционных пальцев щеткодержателей тягового электродвигателя

С целью повышения качества изготовления и ремонта пальцев в ИрГУПС были проведены экспе-

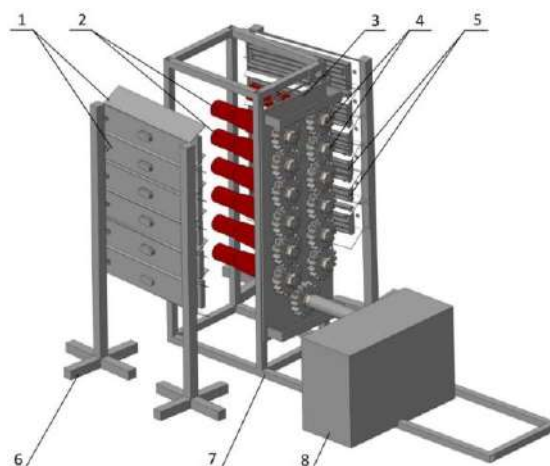


Рис. 4. Макет установки для горизонтального способа запекания:

- 1 – отражатели; 2 – изоляционные пальцы; 3 – пластина с ручьями; 4 – поворотные устройства;
5 – инфракрасные излучатели керамические; 6 – стойка для крепления облучателей;
7 – подставка для установки; 8 – мотор-редуктор с частотным преобразователем

Fig. 4. The layout of the installation for the horizontal baking method:

- 1 – reflectors; 2 – insulating fingers; 3 – a plate with handles; 4 – rotary devices; 5 – ceramic IR emitters;
6 – a stand for mounting irradiators; 7 – a stand for installation; 8 – a gear motor with a frequency converter

С целью повышения качества изготовления и ремонта пальцев в ИрГУПС были проведены экспериментальные исследования, по результатам которых запатентовано несколько способов и средств для повышения ресурса изоляционных пальцев при изготовлении и ремонте с использованием ИК-излучения. В некоторых случаях предлагаются установки с горизонтальным расположением пальцев при сушке пропиточного состава (рис. 4) [11–15].

При таком конструктивном исполнении в начале процесса кристаллизации полимера часть его будет продолжать стекать с пальца. Поэтому в штатной инструкции рекомендуется в процессе сушки пальцев вертикальное их расположение [16, 17].

Технологический процесс карусельного способа пропитки и сушки полимерной изоляции пальцев кронштейнов щеткодержателей ТЭД ИК-излучением представлен на рис. 5.

Изоляционные пальцы 2 в количестве 12 штук вкручиваются в карусельный транспортер 1. Транспортер начинает равномерно вращаться и в автоматическом режиме осуществляются все три цикла.

В первом цикле автоматически включаются ИК-излучатели 3 и происходит нагрев равномерно вращающихся пальцев 2 перед пропиткой. После завершения цикла нагрева автоматически отключаются ИК-излучатели и включаются форсунки 4 для подачи пропиточного материала на равномерно вращающиеся пальцы. После завершения цикла пропитки изоляционных пальцев 2 автоматически отключаются форсунки 4 и включаются ИК-излучатели для осуществления цикла сушки. По завершении цикла сушки пальцев транспортер останавливается [18, 19].

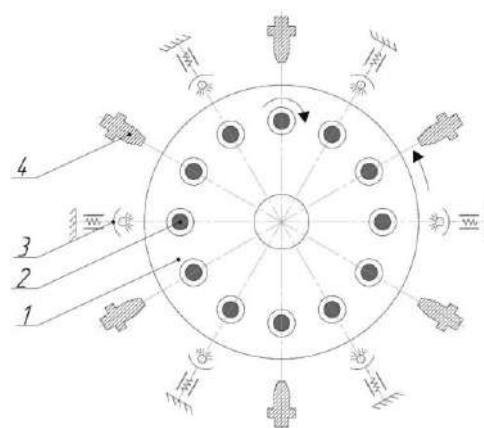


Рис. 5. Карусельный способ пропитки:

- 1 – транспортер карусельный; 2 – изоляционный палец; 3 – инфракрасный облучатель; 4 – форсунка

Fig. 5. Carousel impregnation method:

- 1 – carousel transporter; 2 – insulation finger; 3 – infrared illuminator; 4 – injector

Заключение

В результате применения карусельного способа пропитки и сушки полимерной изоляции пальцев кронштейнов щеткодержателей ТЭД ИК-излучением сокращаются в 2–3 раза расход энергии и не менее чем в 5–10 раз время на технологические операции по пропитке и сушки пальцев кронштейнов щеткодержателей [18].

В качестве математических моделей для расчетов оптимальных режимов ИК-энергоподвода при таком конструктивном решении можно рекомендовать метод двойного преобразования тригонометрических рядов Фурье с постоянным периодом [2, 18].

Список литературы

1. Барэмбо К.Н. Бернштейн Л.М. Сушка, пропитка и компаундирование обмоток электрических машин. М. : Госэнергоиздат, 1961. 368 с.
2. Бублик В.В. Повышение ресурса коллекторно-щеточного узла электрических машин постоянного тока : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01. Омск, 2011. 171 с.
3. Иванов В.Н. Электротехнологическое продление ресурса электрических машин тепловым излучением : дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 172 с.
4. Восстановление изоляционных свойств обмоток якоря тягового электродвигателя / В.П. Смирнов, И.А. Худоногов, В.Н. Иванов и др. // Вестник ИрГТУ. 2006. Т. 28, № 4. С. 60–62.
5. Юренков М.Г. Анализ влияния условий эксплуатации на надежность тяговых электродвигателей // Исследование работы электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава : науч. тр. Омск : Изд-во ОМИИТ, 1974. С. 57–60.
6. Худоногов А.М. Эксплуатационная надёжность тяговых двигателей электровозов Восточного региона // А.М. Худоногов, Ш.К. Исмаилов, В.П. Смирнов, И.С. Гамаюнов, Д.А. Оленцевич, В.Н. Иванов, Д.Ю. Алексеев // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт Труды III Междунар. науч.-техн. конф. 5–8 июня 2007 г. / под ред. В.П. Горелова, С.В. Журавлева, В.А. Глушец. Ч. 1. Омск: Иртышский филиал ФГОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта», 2007. С. 68–70.
7. Алексеев А.Е. Конструкция электрических машин. М. : Госэнергоиздат, 1958. 425 с.
8. Борхерт Р., Юбиц В. Техника инфракрасного нагрева. М. : Госэнергоиздат, 1963. 278 с.
9. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
10. Ваксер Н.М. Изоляция электрических машин. Л. : Ленинград. политехн. ин-т, 1985. 83 с.
11. Худоногов А.М., Дульский Е.Ю., Иванов В.Н. Больше внимания изоляционным конструкциям двигателей // Локомотив. 2018. № 7. С. 36–37.
12. Анализ конструктивных особенностей элементов электромагнитной системы тяговых электродвигателей локомотивов / А.М. Худоногов, Е.Ю. Дульский, В.Н. Иванов и др. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы конф. Иркутск, 2018. Т. 2. С. 351–355.
13. Алексеев Д.Ю. Повышение ресурса изоляции обмоток тяговых электрических машин / Д.Ю. Алексеев, В.П. Смирнов, А.М. Худоногов и др. // Наука и техника транспорта. 2010. № 2. С. 18–21.
14. Иванов В.Н. Восстановление изоляции ТЭД локомотивов с использованием инфракрасного излучения / В.Н. Иванов, Ю.И. Попов, А.С. Куренков и др. // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. 2014. С. 89–92.
15. Математическая модель кинетики нагревания пропитанной изоляции в технологии восстановления ОЛС / В.Н. Иванов, Ю.И. Попов, А.С. Куренков и др. // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. 2014. № 10. С. 92–96.
16. Худоногов А.М., Дульский Е.Ю., Лобыцин И.О. Совершенствование процесса восстановления изоляционных пальцев тяговых электродвигателей // Политранспортные системы : материалы междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2019. С. 312–317.
17. Худоногов А.М. Худоногов И.А., Лобыцин И.О. Управление микрошероховатостью в технологии восстановления изоляционных пальцев коллекторных тяговых электродвигателей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 4 (60). С. 15–23.
18. Анализ методов математического моделирования процесса капсулирования полимерной изоляции электрических машин / А.М. Худоногов, Е.М. Лыткина, Е.Ю. Дульский и др. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Седьмой междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2016. Т. 2. С. 505–509.
19. Пат. 2396669 Рос. Федерация. Локальный способ герметизации компаундом изоляции лобовых частей обмоток тяговых электрических машин / А.М. Худоногов, И.А. Худоногов, В.Н. Иванов и др. № 2009117049/28 ; заявл. 04.05.2009 ; опубл. 10.08.2010. 3 с. : ил.

References

1. Barembo K.N., Bernstein L.M. Sushka, propitka i kompaundirovaniye obmotok elektricheskikh mashin (Drying, impregnation and compounding windings of electrical machines) [Drying, impregnation and compounding of windings of electrical machines]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1961. 368 p.
2. Bublik V.V. Povysheniye resursa kollektorno-shchetochno go uzla elektricheskikh mashin postoyannogo toka : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.09.01 [Increasing the resource of the collector-brush unit of electric machines of constant current: Ph.D. (Engineering) diss.: 05.09.01]. Omsk, 2011. 171 p.
3. Ivanov V.N. Elektrotekhnologicheskoye prodleniye resursa elektricheskikh mashin teplovym izlucheniym : dis. ... kand. tekhn. nauk. [Electrotechnological extension of the resource of electric machines by thermal radiation: Ph.D. (Engineering) diss.]. Moscow, 2014. 172 p.
4. Smirnov V.P., Hudonogov I.A., Ivanov V.N., Ismailov S.K. Vosstanovleniye izolyatsionnykh svoystv obmotok yakorya tyagovogo elektrodvigatelya [Recovery of the insulating properties of the armature windings of the traction motor]. *Vestnik IrGTU [Bulletin INRTU]*, 2006, Vol. 28, No.4, pp. 60–62.
5. Yurenkov M.G. Analiz vliyaniya usloviy ekspluatatsii na nadezhnost' tyagovykh elektrodvigatelye [Analysis of the influence of operating conditions on the reliability of traction electric motors]. *Issledovaniye raboty elektrooborudovaniya i voprosy*

prochnosti elektropodvizhnogo sostava : nauch. tr. [Study of the work of electrical equipment and the strength of electric rolling stock: scientific tr.]. Omsk: OmIIT Publ., 1974, pp. 57–60.

6. Khudonogov A.M., Ismailov Sh.K., Smirnov V.P., Gamayunov I.S., Olentsevich D.A., Ivanov V.N., Alekseev D.Yu. Eksploatatsionnaya nadozhnost' tyagovykh dvigateley elektrovozov Vostochnogo regiona [Operational reliability of traction engines of electric locomotives of the Eastern region]. *Energetika, ekologiya, energosberezheniye, transport. Trudy III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. 5–8 iyunya 2007 g. / pod red. V.P. Gorelova, S.V. Zhuravleva, V.A. Glushets [Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference "Power Engineering, ecology, energy saving, transport", June 5–8, 2007. In V.P. Gorelov, S.V. Zhuravlev, V.A. Glushets (ed.)].* Omsk: Irtysh branch of the Federal State Educational Institution of Higher Education "Novosibirsk State Academy of Water Transport", 2007, Part 1, pp. 68–70.

7. Alekseev A.E. Konstruktsiya elektricheskikh mashin [The construction of electric machines]. Moscow: Gosénergoizdat Publ., 1958. 425 p.

8. Borchert R., Yubits V. Tekhnika infrakrasnogo nagreva [Technique of infrared heating]. Moscow: Gosénergoizdat Publ., 1963. 278 p.

9. Filippov I.F. Teploobmen v elektricheskikh mashinakh [Heat exchange in electric machines]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986. 256 p.

10. Vaxer N.M. Izolyatsiya elektricheskikh mashin [Insulation of electric machines]. Leningrad: Leningrad Polytechnic Institute, 1985. 83 p.

11. Khudonogov A.M., Dul'sky E.Y., Ivanov V.N. Bol'she vnimaniya izolyatsionnym konstruktsiyam dvigateley [More attention to the insulating structures of engines]. *Lokomotiv [Lokomotiv]*, 2018, No. 7, pp. 36–37.

12. Khudonogov A.M., Dul'sky E.Y., Ivanov V.N. et al. Analiz konstruktivnykh osobennostey elementov elektromagnitnoy sistemy tyagovykh elektrodvigateley lokomotivov [Analysis of the design features of the elements of the electromagnetic system of traction electric engines of locomotives]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*, 2018, Vol. 2, pp. 351–355.

13. Alekseev D.Yu., Smirnov V.P., Hudonogov A.M. et al. Povysheniye resursa izolyatsii obmotok tyagovykh elektricheskikh mashin [Improving the resource to the windings of traction electric machines]. *Nauka i tekhnika transporta [Science and technology of transport]*, 2010, No. 2, pp. 18–21.

14. Ivanov V.N., Popov Yu.I., Kurenkov A.S. et al. Vosstanovleniye izolyatsii TED lokomotivov s ispol'zovaniyem infrakrasnogo izlucheniya [Restoration of insulation of TED locomotives using infrared radiation]. *Sovremennyye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta [Modern problems of improving the work of railway transport]*, 2014, pp. 89–92.

15. Ivanov V.N., Popov Yu.I., Kurenkov A.S. et al. Matematicheskaya model' kinetiki nagrevaniya propitannoy izolyatsii v tekhnologii vosstanovleniya OLS [Mathematical model of heating kinetics of impregnated insulation in the technology of OLS recovery]. *Sovremennyye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta [Modern problems of improving the work of railway transport]*, 2014, pp. 92–96.

16. Khudonogov A.M., Dul'sky E.Yu., Lobytsin I.O. Sovershenstvovaniye protsessa vosstanovleniya izolyatsionnykh pal'tsev tyagovykh elektrodvigateley [Improvement of the process of restoring the insulating fingers of traction electric motors]. *Poli-transportnyye sistemy: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Polytransport systems: materials of the international scientific and technical conference]*. Novosibirsk, 2019, pp. 312–317.

17. Khudonogov A.M., Khudonogov I.A., Lobytsin I.O. Upravleniye mikrosherokhovatost'yu v tekhnologii vosstanovleniya izolyatsionnykh pal'tsev kollektornykh tyagovykh elektrodvigateley [Micro-roughness control in the technology of restoration of insulation fingers of collector traction electric motors]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2018, No. 4(60), pp. 15–23.

18. Khudonogov A.M., Lytkina E.M., Dul'sky E.Yu. et al. Analiz metodov matematicheskogo modelirovaniya protsessa kapsulirovaniya polimernoy izolyatsii elektricheskikh mashin [Analysis of methods of mathematical modeling of the process of encapsulation of polymer insulation of electric machines]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2016, Vol. 2, pp. 505–509.

19. Khudonogov A.M., Khudonogov I.A., Ivanov V.N., Pyichev N.G., Olentsevich D.A., Sidorov V.V., Lytkina E.M. *Lokallyy sposob germetizatsii kompaundom izolyatsii lobovykh chastey obmotok tyagovykh elektricheskikh mashin [Local method of sealing the insulation of the frontal parts of the windings of traction electric machines with a compound]*. Utility model patent RU 2396669 C1, 10.08.2010. Application No. 2009117049/28, dated May 04, 2009.

Информация об авторах

Худоногов Анатолий Михайлович – д-р техн. наук, проф., профессор кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: a.hudonogov@yandex.ru

Иванов Владимир Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: v.n.ivanov40161@yandex.ru

Information about the authors

Anatoly M. Khudonogov – Doctor of Sciences in Engineering, professor, professor of the Subdepartment Electric rolling stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: a.hudonogov@yandex.ru

Vladimir N. Ivanov – Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Associate, Professor the Subdepartment of Electric rolling stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: v.n.ivanov40161@yandex.ru

Создание модели беспилотного летательного аппарата типа биплан, использующей генетический алгоритм в полете, для помощи в решении проблемы пожаров в Иркутской области

О. В. Кузьмин✉, М. В. Лавлинский

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ quzminov@mail.ru

Резюме

С конца июля 2019 г. в Сибири был зафиксирован резкий рост площади природных пожаров. Наиболее сложная ситуация складывается в Иркутской области, где одни районы страдают от наводнений, другие – от природных пожаров. Для того чтобы эффективнее бороться со стихийными бедствиями, происходящими на территории как Приангарья, так и России в целом, предлагается данный проект – разработка беспилотных летательных аппаратов, способных работать автономно и выполнять ряд задач по сбору информации. Экологическая ситуация в целом на водосборной территории озера Байкал продолжает усугубляться с каждым днем. Масштабную угрозу экологии водосборного бассейна несут не только стихийные бедствия (лесные пожары и наводнения), но и несанкционированные свалки твердых бытовых отходов, браконьерство, а также загрязнение Байкала туристами. Безусловно, необходим постоянный и оперативный экологический мониторинг состояния водосборного бассейна озера Байкал, в котором может оказаться полезным создаваемый модельный ряд беспилотных летательных аппаратов, в том числе разработанная ранее модель квадрокоптера-эколога. Данная статья посвящена проектированию модели беспилотного летательного аппарата, предназначенного для помощи в мониторинге лесных массивов и водных пространств Иркутской области. Проектирование выполнено с учетом того, что аппарат должен функционировать в неблагоприятных климатических условиях и бортовой компьютер способен поддерживать работу с нейронной сетью. Обосновывается выбор концепции беспилотного летательного аппарата – биплан со стреловидными крыльями. Компьютерное трехмерное моделирование выполнено в универсальной программе Autodesk Fusion 360. В работе представлен чертеж полученной компьютерной модели. Предлагаемая САД-модель позволит получить необходимые для создания натурных моделей чертежи и G-код для 3D-печати и возможного применения фрезерного и лазерного станка. Приводится описание процесса создания тестовой модели и оснащения ее электроникой. В основе программного обеспечения беспилотного летательного аппарата будет использоваться генетический алгоритм. Выбрана архитектура нейросети и проведены необходимые математические расчеты.

Ключевые слова

беспилотный летательный аппарат, биплан, трехмерное моделирование, пожары, наводнения, генетический алгоритм, натурная тестовая модель

Для цитирования

Кузьмин О. В. Создание модели беспилотного летательного аппарата типа биплан, использующей генетический алгоритм в полете, для помощи в решении проблемы пожаров в Иркутской области / О. В. Кузьмин, М. В. Лавлинский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 185–192. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).185-192

Информация о статье

поступила в редакцию: 25.08.2021, поступила после рецензирования: 14.09.2021, принята к публикации: 17.09.2021

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-41-385001

Creation of a biplan type uav model using a genetic algorithm in flight to help in solving the problem of fires in the Irkutsk region

O. V. Kuzmin✉, M. V. Lavlinsky

Irkutsk State University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ quzminov@mail.ru

Abstract

Since the end of July 2019, a sharp increase in the area of wildfires has been recorded in Siberia. The most difficult situation is in the Irkutsk region, where some areas suffer from floods, while others - from wildfires. In order to more effectively deal with nat-

ural disasters occurring on the territory of both the Angara region and Russia as a whole, the project is proposed for the development of unmanned aerial vehicles (UAVs) capable of operating autonomously and performing a number of tasks to collect information. The ecological situation in general in the catchment area of Lake Baikal continues to worsen every day. Not only natural disasters (forest fires and floods), but also unauthorized solid waste dumps, poaching, and tourist pollution of Lake Baikal pose a large-scale threat to the ecology of the drainage basin. Of course, constant and operational environmental monitoring of Lake Baikal drainage basin condition seems urgent, making quite useful the created model range of UAVs, including the model of a quadcopter-ecologist, developed by our team earlier. This article is devoted to the design of a UAV model штреутувв to help monitor forests and water areas of the Irkutsk region. The design was carried out taking into account the fact that the device must operate in adverse climatic conditions and the on-board computer is capable of working in the interaction with a neural network. The choice of the UAV concept is substantiated - a biplane with swept wings. Computer three-dimensional modeling (CAD) is carried out in the universal program Autodesk Fusion 360. The work presents a drawing of the resulting computer model. The created CAD model will allow obtaining the drawings and G-code necessary for creating full-scale models for 3D printing and the possible use of a milling and laser machine tools. A description of the process of creating a test model and equipping it with electronics is given. The UAV software will be based on a genetic algorithm. The architecture of the neural network was chosen and the necessary mathematical calculations were carried out.

Keywords

uav, biplane, 3D modeling, fires, floods, genetic algorithm, full-scale test model

For citation

Kuzmin O.V., Lavlinsky M.V. Sozдание modeli bespilotnogo letatel'nogo apparata tipa biplan, ispol'zuyushchei geneticheskiy algoritm v polete, dlya pomoshchi v reshenii problemy pozharov v Irkutskoi oblasti [Creation of a biplane type uav model using a genetic algorithm in flight to help in solving the problem of fires in the Irkutsk region]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 185–192. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).185-192

Article Info

Received: 25.08.2021, Revised: 14.09.2021, Accepted: 17.09.2021

Acknowledgments

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Irkutsk Region within the framework of the scientific project No. 20-41-385001

Введение

Проблема лесных пожаров по-прежнему является достаточно актуальной для России. И, к сожалению, Иркутская область находится на высоком месте в рейтинге по площади, охваченной пожарами среди регионов нашей страны. Кроме того, в Иркутской области частыми стихийными бедствиями являются наводнения. Для того чтобы результативнее вести борьбу с природными бедствиями, случающимися на территории, как нашей области, так и России в целом, предлагается данный проект – модель беспилотного летательного аппарата (БПЛА), работающего автономно и выполняющего мониторинг лесных массивов и водных пространств [1–7].

Концепция беспилотного летательного аппарата и его конструктивные особенности

Выбор концепции БПЛА был обусловлен тремя основными факторами:

1. Мобильность. Не требует длинной взлетной полосы и легко транспортируется.
2. Небольшие затраты на производство и обслуживание. Из-за малого веса аппарату не требуется много топлива, а в силу небольших размеров его производство проще и дешевле.
3. Отсутствие рисков для пилота. Потеря БПЛА не только дешевле, чем потеря полноразмер-

ного летательного аппарата, но и не представляет опасность для пилота [8–15].

Для БПЛА будет актуальна самолетная платформа исходя из следующих аспектов:

- высокие летно-технические характеристики;
- покрытие больших площадей при съемке и наблюдении;
- большое время в полете (до 2–3 ч);
- возможность полета при ветре до 30 м/с [16].

Модель БПЛА будет иметь конструкцию биплана, чтобы увеличить подъемную силу при меньшем размахе крыла, с круговым крылом, т. е. верхняя и нижняя поверхность соединены на концах. Размах крыльев 1,4 м, длина фюзеляжа 1,4 м. Крылья имеют стандартный профиль, плоские снизу, предназначенные для уменьшения давления на верхнюю часть крыла. Угол атаки передних крыльев 10°, задних 0° [12]. Эффективность данного тандема крыльев подтверждают проведенные расчеты. Также из расчетов следует, что БПЛА достаточно иметь скорость более 82 км/ч для удержания в воздухе, эта скорость вполне достижима и достаточно мала, для того чтобы нейросеть бортового компьютера успевала обрабатывать снимки в потоковом режиме [1, 17–20].

Несущие винты самолета располагаются в плоскости крыльев и позволяют совершать вертикальный взлет – посадку, что необходимо для рабо-

ты в условиях удаленных регионов, не оборудованных взлетно-посадочными полосами. Два задних винта после взлета переводятся в горизонтальное положение и обеспечивают скорость достаточную для продолжения полета в горизонтальной плоскости. Средняя скорость БПЛА (по предварительным расчетам) составит 80–150 км/ч [21–23].

Создание компьютерной модели беспилотного летательного аппарата

Для создания компьютерной модели БПЛА

(рис. 1.) использована универсальная программа создания инженерных проектов Autodesk Fusion 360. При создании модели были применены инструменты проектирования, такие как выдавливание, вращение, сопряжение, лофт и булевы операции.

Для компьютерной модели была создана необходимая чертежная документация (рис. 2).

Создание тестового образца беспилотного летательного аппарата

Далее переходим к созданию тестового об-

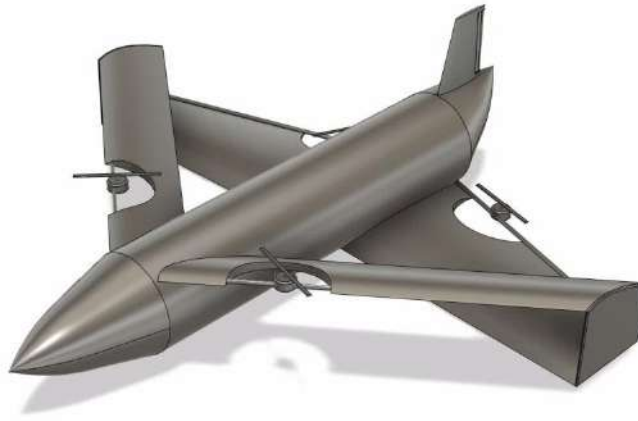


Рис. 1. Компьютерная модель беспилотного летательного аппарата

Fig. 1. The UAV computer model

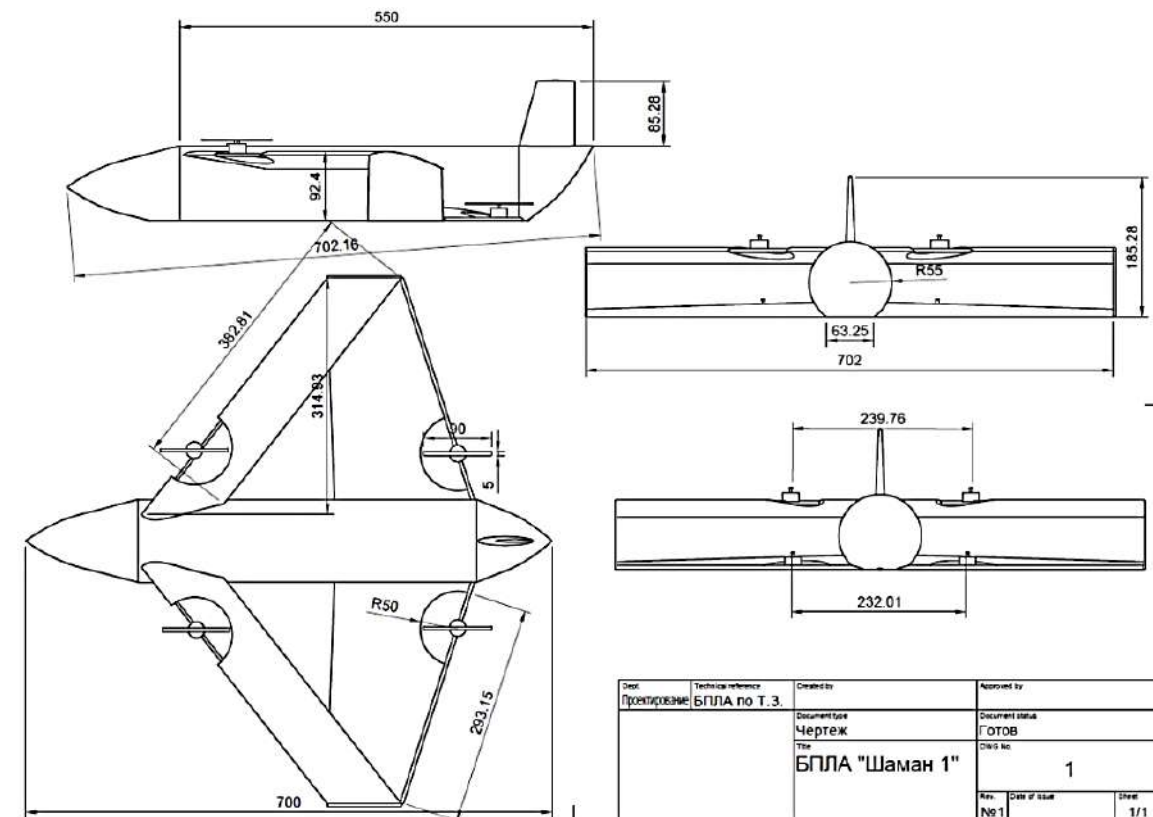


Рис. 2. Ассоциативный чертеж беспилотного летательного аппарата

Fig. 2. The UAV associative drawing

разца БПЛА в меньшем масштабе для исследования конструкции, летных качеств и проверки программного обеспечения.

Корпус модели создается из специального материала, предназначенного для авиамоделирования. Технология производства следующая:

1. На центральную пластину крепятся ребра (рис. 3).

2. Наклеивается обшивка (рис. 4).

Крыло производится по той же технологии, но с применением дополнительных ребер жесткости. Части со сложной геометрией, а именно нос и корма печатаются на 3D-принтере, в виде тонкостенных моделей.

Электроника тестовой модели БПЛА будет состоять из четырех связок: мотор-регулятор

(рис. 5.), подсоединенный к общему аккумулятору, платформы Arduino Mega и Raspberry Pi 4, камеры, датчики и сервоприводы [13, 14, 17].

Программное обеспечение модели беспилотного летательного аппарата

Реализация программного обеспечения модели БПЛА будет проходить по следующему алгоритму:

1. Создание симулируемого пространства в Autodesk CFD для тестирования возможности полета.

2. Создание условий взаимодействия между симуляцией полета и алгоритмом на Python.

3. Создание генетического алгоритма NEAT, где функции приспособленности будут вычисляться в ходе тестирования модели в симулированном пространстве.



Рис. 3. Пластина с ребрами

Fig. 3. Ribbed plate



Рис. 4. Обшивка

Fig. 4. Cladding



Рис. 5. Мотор-регулятор
Fig. 5. Regulation motor

4. Установка операционной системы для Raspberry PI 4.

5. Экспортирование весов алгоритма на плату Raspberry PI 4.

6. Написание программы для преобразования экспортируемых весов в алгоритм действий, по которым будет летать модель БПЛА.

7. Запуск на Raspberry PI 4.

Описание генетического алгоритма

Метод NEAT предназначен для уменьшения размерности пространства поиска параметров посредством постепенного развития структуры нейросети в процессе эволюции. Эволюционный процесс начинается с популяции маленьких, простых геномов (семян) и постепенно увеличивает их сложность с каждым новым поколением. Геномы семян имеют очень простую топологию: доступны (экспрессированы) только входные, выходные и смещающие нейроны. На начальном этапе скрытые узлы отсутствуют, чтобы гарантировать, что поиск решения начинается в пространстве параметров (весов связей) с наименьшим числом измерений. С

каждым новым поколением вводятся дополнительные гены, расширяющие пространство поиска решения, представляя новое измерение, которого ранее не существовало.

Таким образом, эволюция начинается с поиска в небольшом пространстве, которое можно легко оптимизировать, и при необходимости добавляет новые измерения. При таком подходе сложные фенотипы (решения) могут быть открыты постепенно, шаг за шагом, что намного результативнее, чем запуск поиска непосредственно в обширном пространстве окончательных решений. Естественная эволюция использует похожую стратегию, время от времени добавляя новые гены, которые делают фенотипы более сложными.

Схема генетического кодирования NEAT разработана таким образом, чтобы можно было легко сопоставлять соответствующие гены во время процесса. Геном NEAT является линейным представлением схемы связей кодированной нейронной сети (рис. 6).

Каждый геном представлен в виде списка генов связей, которые кодируют связи между узлами

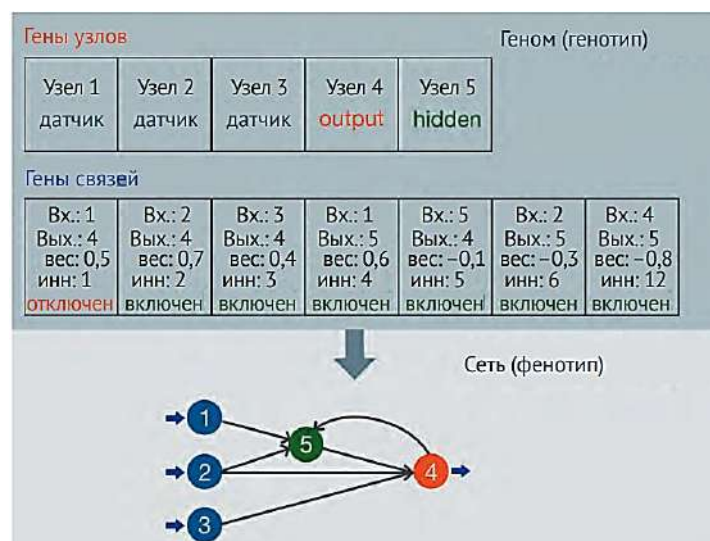


Рис. 6. Схема связей кодированной нейронной сети
Fig. 6. Connection scheme of the incoded nueral network

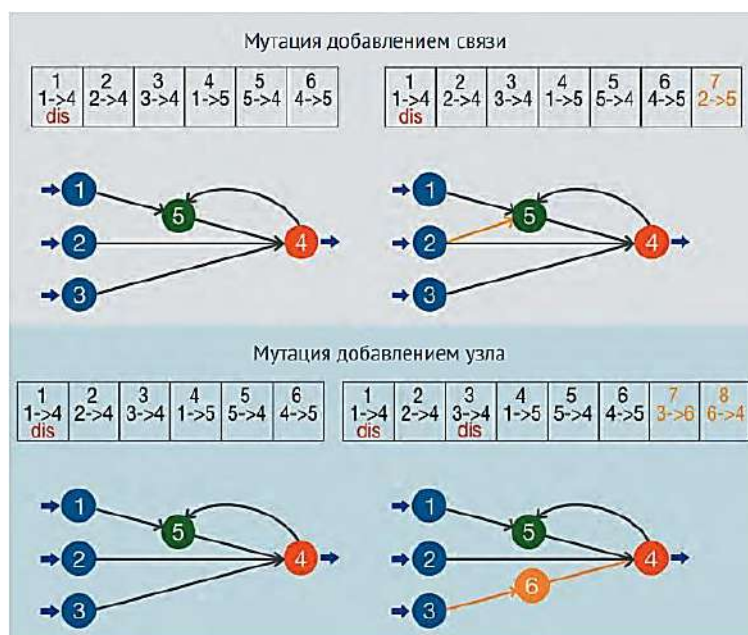


Рис. 7. Структурные мутации алгоритма NEAT
Fig. 7. Structural mutations of the NEAT algorithm

нейронной сети. Кроме того, существуют гены узлов, которые кодируют информацию о сетевых узлах, такую как идентификатор узла, тип узла и тип функции активации. Ген связи кодирует следующие параметры связи между узлами:

- идентификатор входного узла;
- идентификатор выходного узла;
- сила (вес) связи;
- бит, который указывает, включена (экспрессирована) связь или нет;
- номер обновления, который позволяет сопоставлять гены во время рекомбинации.

Специфический для NEAT оператор мутации может изменить силу (вес) связи и структуру сети. Существует два основных типа структурных мутаций: добавление новой связи между узлами; добавление нового узла в сеть. Структурные мутации алгоритма NEAT схематически изображены на рис. 7.

Когда оператор мутации применяется к геному NEAT, вновь добавленному гену (гену связи или гену узла) присваивается очередной номер обновления. В ходе эволюционного процесса геномы организмов в популяции постепенно становятся больше, и образуются геномы различных размеров. Этот

процесс приводит к тому, что в одинаковых позициях в геноме находятся разные гены связей, что делает процесс сопоставления между генами одного и того же происхождения чрезвычайно сложным.

Результаты исследования

Разработана концепция БПЛА типа биплан для помощи в решении проблемы пожаров в Иркутской области. Конструктивные особенности аппарата позволят ему эффективно выполнять широкий класс задач в условиях неблагоприятных климатических условий. Создана компьютерная трехмерная модель и чертежи с помощью системы автоматизированного проектирования Autodesk Fusion 360. Реализован тестовый образец БПЛА и тестовое программное обеспечение к нему с использованием генетического алгоритма.

Заключение

Таким образом, проект БПЛА готов к тестированию своих летных качеств и программного обеспечения. Перед этим он прошел все этапы прототипирования: от идеи до тестовой модели.

Список литературы

1. Birkhoff G. Lattice Theory. N.Y. : American Mathematical Society, 1967. 418 p.
2. Fire Detection in Trains Using Image Analysis: A Survey and a Novel Approach. URL: https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/142862/3/2018_10_CINAR_DILARA.pdf (дата обращения: 15.01.2021).
3. Kuzmin O.V., Khomenko A.P., Artyunin A.I. Development of special mathematical software using combinatorial numbers and lattice structure analysis // Advances and Applications in Discrete Mathematics. 2018. Vol. 19, Iss. 3. P. 229–242.
4. Kuzmin O.V., Khomenko A.P., Artyunin A.I. Discrete model of static loads distribution management on lattice structures // Advances and Applications in Discrete Mathematics. 2018. Vol. 19, Iss. 3. P. 183–193.
5. Mesarovic M., Mako D., Takahara Y. Theory of Hierarchical Multilevel Systems. New York : Academic Press, 1970. 294 p.

6. Ле Динь Дат, Руденко М.Г., Данеев А.В. БПЛА для проведения мониторинга объектов нефтегазовой промышленности // *Современные технологии и научно-технический прогресс*. 2018. Т. 1. С. 75–77.
7. Лесные пожары в России. Статистика и антирекорды. URL: <https://tass.ru/info/6712527> (дата обращения: 20.02.2021).
8. Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York : McGraw-Hill, 1980. 287 p.
9. Stanley R.P. *Enumerative Combinatorics*. Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 335 p.
10. Zakharov D.V., O.V. Kuzmin The application of relational interactive logic in control operation problems by the example of monitoring the server equipment of transport systems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 760. P. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/0120589.
11. Балагура А.А., Кузьмин О.В. Обобщенная пирамида Паскаля и частично упорядоченные множества // *Обозрение прикладной и промышленной математики*. 2007. Т. 14, Вып. 1. С. 88–91.
12. Классификация БПЛА и системы их интеллектуального управления / С.И. Федоров, А.В. Хаустов, Т.М. Крамаренко и др. // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. 2016. № 74. С. 12–21.
13. Кузьмин О.В., Старков Б.А. Иерархические структуры типа треугольника Паскаля и построение навигационных маршрутов // *Актуальные проблемы науки Прибайкалья* : сб. ст. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2020. Вып. 3. С. 119–123.
14. Кузьмин О.В. Обобщенные пирамиды Паскаля и их приложения. Новосибирск : Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 2000. 294 с.
15. Кузьмин О.В., Серёгина М.В. Плоские сечения обобщенной пирамиды Паскаля и их интерпретации // *Дискретная математика*. 2010. Т. 22, Вып. 3. С. 83–93.
16. Лавлинская А.А., Филь Г.А., Камнев М.Д. Создание модели квадрокоптера-эколога // *Прикладные вопросы дискретного анализа* : сб. науч. тр. / под ред. О.В. Кузьмина. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2020. Вып. 5. С. 78–83.
17. Кузьмин О.В. Роль дискретной математики в научной работе старшеклассников // *Компьютер в школе*. 2000. № 2 (16). С. 12–14.
18. Кузьмин О.В., Лавлинская А.А., Филь Г.А., Камнев М.Д. Обнаружение лесных пожаров с помощью беспилотных летательных аппаратов // *Математика, ее приложения и математическое образование (МПМО-20)* : материалы VII Междунар. конф. Улан-Удэ : Изд-во ВСГУТУ. 2020. С. 134–136.
19. Пеллинен В.А., Светлаков А.А. Применение беспилотников при анализе криогенных форм рельефа долины реки Сенца Окинского плоскогорья // *Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле*. 2020. Т. 31. С. 58–67.
20. Пятаева А.В. Сегментация областей задымления на видеопоследовательности // *Вестник СибГАУ*. 2016. № 3. С. 625–630.
21. Стасенко А.Л. *Физика полета*. М. : Наука, 1988. 144 с. (Б-чка «Квант». Вып. 70.). С. 18–22.
22. Хмельницкая К.А. Распознавание пламени с помощью оптоэлектронных систем в судостроении // *Тр. Крылов. гос. науч. центра*. 2019. Спец. вып. 2. С. 277–281.
23. Обнаружение лесных пожаров с помощью беспилотных летательных аппаратов / О.В. Кузьмин, А.А. Лавлинская, Г.А. Филь и др. // *Математика, ее приложения и математическое образование (МПМО'20)* : материалы VII Междунар. конф. г. Улан-Удэ, 2020. С. 134–136.

References

1. Birkhoff G. *Lattice Theory*. N.Y. : *American Mathematical Society*, 1967. 418 p.
2. Fire Detection in Trains Using Image Analysis: A Survey and a Novel Approach. URL: https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/142862/3/2018_10_CINAR_DILARA.pdf Accessed: January 15, 2021.
3. Kuzmin O.V., Khomenko A.P., Artyunin A.I. Development of special mathematical software using combinatorial numbers and lattice structure analysis. *Advances and Applications in Discrete Mathematics*, 2018, Vol. 19, Issue 3, pp. 229–242.
4. Kuzmin O.V., Khomenko A.P., Artyunin A.I. Discrete model of static loads distribution management on lattice structures. *Advances and Applications in Discrete Mathematics*, 2018, Vol. 19, Issue 3, pp. 183–193.
5. Mesarovi M., Mako D., Takahara Y. *Theory of Hierarchical Multilevel Systems*. New York: Academic Press, 1970. 294 p.
6. Le Dinh Dat, Rudenko M.G., Daneev A.V. BPLA dlya provedeniya monitoringa ob"yektov neftegazovoy promyshlennosti [UAVs for monitoring oil and gas facilities]. *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskiiy progress [Modern technologies and scientific and technical progress]*, 2018, Vol. 1, pp. 75–77.
7. Lesnyye pozhary v Rossii. Statistika i antirekordy [Forest fires in Russia. Statistics and anti-records]. URL: <https://tass.ru/info/6712527> Accessed: February 20, 2021.
8. Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p.
9. Stanley R.P. *Enumerative Combinatorics*. Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 335 p.
10. Zakharov D.V., Kuzmin O.V. The application of relational interactive logic in control operation problems by the example of monitoring the server equipment of transport systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 760, pp. 1-8. DOI: 10.1088 / 1757-899X / 760/1/0120589.
11. Balagura A.A., Kuzmin O.V. Obobshchennaya piramida Paskalya i chastichno uporyadochennyye mnozhestva [Generalized Pascal pyramid and partially ordered sets]. *Obzreniye prikladnoy i promyshlennoy matematiki [Review of applied and industrial mathematics]*, 2007, Vol. 14, No. 1, pp. 88–91.
12. Fedorov S.I., Khaustov A.V., Kramarenko T.M. et al. Klassifikatsiya BPLA i sistemy ikh intellektual'nogo upravleniya [Classification of UAVs and their intelligent control systems]. *Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii*

[*Open information and computer integrated technologies*], 2016, No. 74, pp. 12–21.

13. Kuzmin O.V., Starkov B.A. Iyerarkhicheskiye struktury tipa treugol'nika Paskalya i postroyeniye navigatsionnykh marshrutov [Hierarchical structures of the Pascal triangle type and the construction of navigation routes]. *Aktual'nyye problemy nauki Pribaykal'ya* [Actual problems of science in the Baikal region]. Irkutsk: IGU Publ., 2020, pp. 119–123.

14. Kuzmin O.V. Obobshchennyye piramidy Paskalya i ikh prilozheniya [Generalized Pascal pyramids and their applications]. Novosibirsk: Nauka. Sib. izd. firma RAN, 2000. 294 p.

15. Kuzmin O.V., Seregina M.V. Ploskiye secheniya obobshchennoy piramidy Paskalya i ikh interpretatsii [Plane sections of the generalized Pascal pyramid and their interpretations]. *Diskretnaya matematika* [Discrete Mathematics], 2010, Vol. 22, No. 3, pp. 83–93.

16. Lavlinskaya A.A., Fil G.A., Kamnev M.D. Sozdaniye modeli kvadroptera-ekologa [Creation of a model of a quadcopter-ecologist]. *Prikladnyye voprosy diskretnogo analiza : sb. nauch. tr. Pod red. O.V. Kuz'mina* [Applied questions of discrete analysis: collection of articles. scientific. tr. In O.V. Kuzmina (ed.)]. Irkutsk: IGU Publ., 2020, Issue 5, pp. 78–83.

17. Kuzmin O.V. Rol' diskretnoy matematiki v nauchnoy rabote starsheklassnikov [The role of discrete mathematics in the scientific work of high school students]. *Komp'yuter v shkole* [Computer at school], 2000, No. 2(16), pp. 12–14.

18. Kuzmin O.V., Lavlinskaya A.A., Fil G.A., Kamnev M.D. Obnaruzheniye lesnykh pozharov s pomoshch'yu bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Detection of forest fires using unmanned aerial vehicles]. *Matematika, yeye prilozheniya i matematicheskoye obrazovaniye (MPMO-20). Materialy VII Mezhdunar. konf.* [Mathematics, its applications and mathematical education (MPMO-20). Materials of the VII International Conference]. Ulan-Ude: VSGUTU Publ., 2020, pp. 134–136.

19. Pellinen V.A., Svetlakov A.A. Primeneniye bespilotnikov pri analize kriogennykh form rel'yefa doliny reki Sentsa Okinskogo ploskogor'ya [The use of unmanned aerial vehicles in the analysis of cryogenic landforms of the Sentsa river valley of the Okinsky plateau]. // *Izv. Irkut. gos. un-ta. Ser. Nauki o Zemle* [Bulletin of the Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2020, Vol. 31, pp. 58–67.

20. Pyataeva A.V. Segmentatsiya oblastey zadymleniya na videoposledovatel'nosti [Segmentation of areas of smoke on the video sequence]. *Vestnik SibGAU* [Bulletin of SibGAU], 2016, No. 3, pp. 625–630.

21. Stasenko A.L. Fizika poleta [Physics of flight]. Moscow: Nauka Publ. Ch. ed. physical-mat. lit., 1988. 144 p. (B-chka "Quant". Iss. 70.), pp. 18–22.

22. Khmel'nitskaya K.A. Raspoznavaniye plameni s pomoshch'yu optoelektronnykh sistem v sudostroyenii [Flame recognition using optoelectronic systems in shipbuilding]. *Tr. Krylov. gos. nauch. tseotra* [Proceedings of the Krylov State Scientific Center], 2019, Special Issue 2, pp. 277–281.

23. Kuzmin O.V., Lavlinskaya A.A., Fil G.A. et al. Obnaruzheniye lesnykh pozharov s pomoshch'yu bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Detection of forest fires using unmanned aerial vehicles]. *Matematika, yeye prilozheniya i matematicheskoye obrazovaniye (MPMO'20) : materialy VII Mezhdunar. konf.* [Mathematics, its applications and mathematical education (MPMO'20). Materials of the VII International Conference]. Ulan-Ude, 2020, pp. 134–136.

Информация об авторах

Кузьмин Олег Викторович – д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой теории вероятностей и дискретной математики Института математики и информационных технологий, Иркутский государственный университет, г. Иркутск, e-mail: quzminov@mail.ru.

Лавлинский Максим Викторович – аспирант Института математики и информационных технологий, Иркутский государственный университет, г. Иркутск, e-mail: lavlinskimv@mail.ru

Information about the authors

Oleg V. Kuz'min – Dr.Sc.In Physics and mathematics, Head of Subdepartment of Probability Theory and Discrete Mathematics in the Institute of Mathematics and Information technologies, Irkutsk State University, Irkutsk, e-mail: quzminov@mail.ru

Maksim V. Lavlinskyi – Ph.D.student of Subdepartment in the Institute of Mathematics and Information technologies, Irkutsk State University, Irkutsk, e-mail: lavlinskimv@mail.ru

Безопасность и эксплуатация железнодорожного транспорта при выполнении комплексных работ по неразрушающему контролю подшипников буксовых узлов

Л. В. Мартыненко✉

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

✉ liuba.martinenko@yandex.ru

Резюме

В статье рассмотрены температурные зависимости, приводящие к отказам буксовых узлов на грузовом подвижном составе. Представлены основные неисправности и дефекты, влияющие на отказ буксового узла. В эксплуатации работоспособность подшипников определяется главным образом температурой нагрева буксовых узлов. Основной контроль изменения температуры производится при помощи автоматизированного устройства, которое считывает информацию по нагреву буксового узла с помощью инфракрасного излучателя, встроенного в комплекс технических средств модернизированный. Буксовые узлы вагонов и локомотивов всегда были предметом особого контроля для обеспечения безопасности движения подвижного состава. В условиях повышенного роста скоростей движения и возросшей грузоподъемности по всей сети железных дорог увеличилась нагрузка на ходовые части вагона и буксового узла в целом. В сложившейся ситуации работоспособность буксового узла уменьшается, а нагрузка увеличивается, что приводит к неправильной работе и отказу данного узла. Рассмотрена статистика по нагреву буксового узла в четном и нечетном направлениях. Приведены данные, снятые с комплекса технических средств модернизированного для сравнительного анализа движения вагонов с разными техническими параметрами и перевозимым грузом, а также неисправностями в системе «колесо – рельс». В эксплуатации часто встречаются неисправности, возникающие в результате заклинивания подшипников, которые происходят при неправильном подборе тел качения по длине и диаметру. Отцепы грузового подвижного состава в основном происходят по отказам буксовых узлов, и основной процент отказа приходится на неисправности торцевого крепления и тел качения подшипника.

Ключевые слова

железнодорожный транспорт, безопасность движения, неразрушающий контроль, буксовый узел, система «колесо – рельс», неисправности подшипников

Для цитирования

Мартыненко Л. В. Безопасность и эксплуатация железнодорожного транспорта при выполнении комплексных работ по неразрушающему контролю подшипников буксовых узлов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 193–200. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).193-200

Информация о статье

поступила в редакцию: 04.10.2021, поступила после рецензирования: 13.10.2021, принята к публикации: 24.10.2021

Safety and operation of railway transport when performing complex works on non-destructive testing of axle box bearings

L. V. Martynenko✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ liuba.martinenko@yandex.ru

Abstract

The article considers temperature dependences leading to failures of axle boxes on freight rolling stock. The main malfunctions and defects affecting the failure of the axle box are presented. In operation, the operability of bearings is mainly determined by the heating temperature of the axle boxes. The main control of temperature changes is carried out using an automated device that reads information on the heating of the axle box unit using an infrared emitter built into the upgraded technical means complex. The axle boxes of wagons and locomotives have always been the subject of special control to ensure the safety of rolling stock traffic. Under conditions of increasing traffic speeds and increased load capacity across the entire railway network, the load on the running gear of the car and the axle box as a whole has increased. In the current situation, the operability of the axle box node decreases, and the load increases, which leads to improper operation and failure of this node. The statistics on the heating of the axle box in even and odd directions are considered. The data taken from a set of technical means designed for comparative analysis of the movement of wagons with different technical parameters and transported cargo, as well as malfunctions in the “wheel – rail” system are presented. In operation, malfunctions often occur as a result of bearings jamming, which occur when the rolling

elements are incorrectly selected in length and diameter. Uncoupling of freight rolling stock mainly occurs due to failures of axle assemblies, and the main percentage of failure is due to malfunctions of the end mount and rolling elements of the bearing.

Keywords

railway transport, traffic safety, non-destructive testing, axle box assembly, wheel–rail system, bearing malfunctions

For citation

Martynenko L. V. Bezopasnost' i ehkspluatatsiya zheleznodorozhnogo transporta pri vypolnenii kompleksnykh работ po ne-razrushayush-hemu kontrolyu podshipnikov buksovykh uzlov [Safety and operation of railway transport when performing complex works on non-destructive testing of axle box bearings]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 193–200.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).193-200

Article Info

Received: 04.10.2021, Revised: 13.10.2021, Accepted: 24.10.2021

Введение

В целях обеспечения безопасности движения подвижного состава и предотвращения возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности и эксплуатации железнодорожного транспорта, используют организационную работу по тревожным показаниям средств диагностики комплекса технических средств многофункционального (КТСМ) [1, 2]. При эксплуатационных условиях возникают различные неисправности букс, а именно, самые частые вызванные влиянием внешних условий, механическими деформациями, загрязнением, нарушением технологии изготовления, обслуживания и ремонта грузового подвижного состава [3]. Техническое состояние и работоспособность буксовых узлов определяются главным образом температурой нагрева подшипников. От технического состояния буксового узла зависит температура шейки оси, внутренние зазоры, вязкость смазки и т. д. Нагрев элементов подшипников вызывают разные температурные показатели, которые приводят к деформации деталей в разной степени и могут привести к заклиниванию роликов и отказу буксового узла [4]. Однако существенным признаком большинства неисправностей буксового узла и колесной пары является повышение температуры корпуса буксы и шейки оси при движении подвижного состава. В зимние месяцы число отцепок вагонов по неисправностям подшипников возрастает, что связано с разностью температур окружающей среды и буксового узла. Поэтому температура буксового узла является важнейшим критерием, характеризующим техническое состояние подшипников [5]. В приведенном ниже анализе будут представлены отказы технических средств, учтенных за службой вагонного хозяйства на ВСЖД за 2019–2020 гг.

За 12 месяцев 2020 г. службой было учтено и расследовано 16 отказов технических средств первой и второй категорий. За этот же период 2019 г. было расследовано и учтено 29 случаев отказа технических средств. Снижение составило 45 % [6].

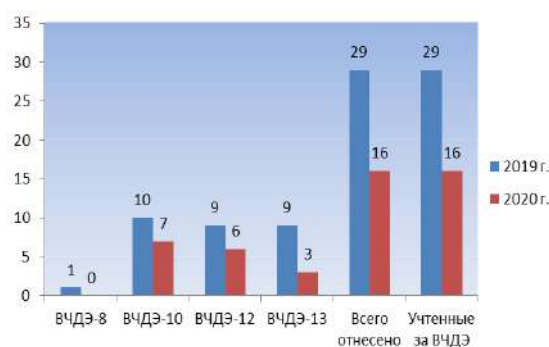


Рис. 1. Отказы первой и второй категорий за 2019–2020 гг.

Fig. 1. Category 1 and 2 failure in the years 2019-2020

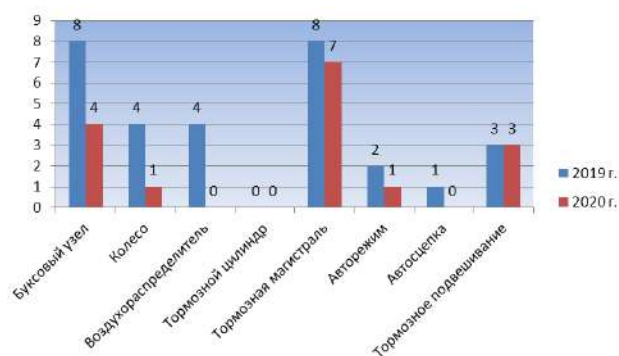


Рис. 2. Причины отказов первой и второй категорий за 2019–2020 гг.

Fig. 2. Reasons of categories 1 and 2 failures in 2019-2020

Причины отказов технических средств первой и второй категорий за 12 месяцев 2020 г.: четыре отказа по буксовому узлу, один – по колесным парам, семь – по тормозной магистрали, один – по авторежиму, три по тормозному подвешиванию. За тот же период 2019 г. причины отказов распределились следующим образом: восемь по буксовому узлу, четыре по колесным парам, четыре по воздухораспределителю, восемь по тормозной магистрали, два по авторежиму, один по автосцепке, три по тормозному подвешиванию [7].

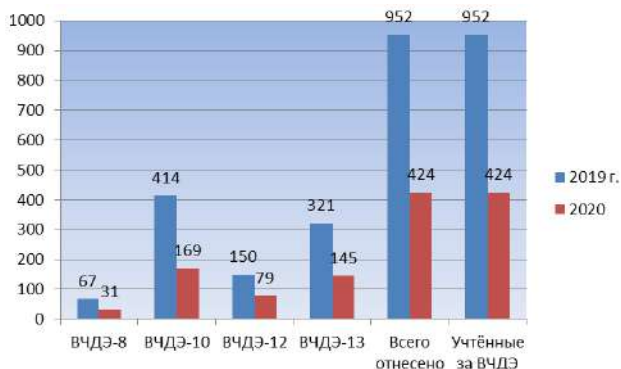


Рис. 3. Отказы третьей категории за 2019–2020 гг.

Fig. 3. Failures of category 3 in 2019-2020

За 12 месяцев 2020 г. за службой было учтено и расследовано 424 отказа технических средств третьей категории, против 952 случаев отказа технических средств в 2019 г. Снижение составило 56 % [8, 9].

Каждый год работниками соответствующих подразделений производится проверка более 4,5 млн деталей и узлов подвижного состава, в том числе более 1,3 млн осей колесных пар, в которых выявляется более 6,5 тыс. дефектов. К сожалению, актуальные в настоящее время средства неразрушающего контроля (НК) таковы, что надежность контроля во много зависит от квалификации и ответственности персонала: из общего количества опасных разрушений около 20 % стали следствиями дефектов, которые пропустил оператор [10].

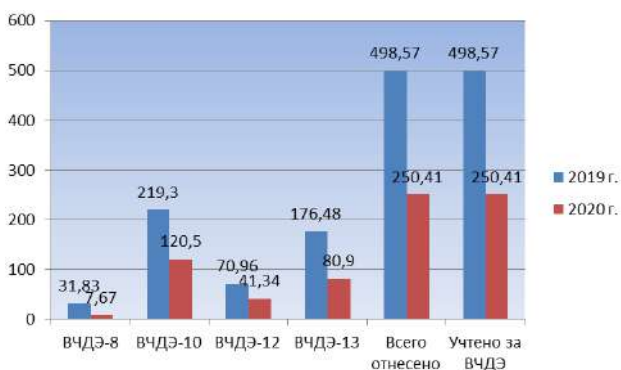


Рис. 4. Поездпотери за 2019–2020 гг.

Fig. 4. Train loss in 2019-2020

За 12 месяцев 2020 г. за службой учтено 250,4 потерь поезд-часов от принятых к учету поездов, против 498,41 в 2019 г., снижение – 248,01 поезд-часов.

Средства диагностики приобретают все большую актуальность в условиях нынешнего роста экономики, когда с увеличением общего объема перевозок возрастает потребность в исправном подвижном составе [11]. Поэтому очень важной зада-

чей является обеспечение необходимой организации и выполнение комплекса работ по вибродиагностике подшипников буксовых узлов, поступающих в ремонт, при входном контроле и при выходном контроле после проведения ремонта. В целях обеспечения безопасности движения подвижного состава и предотвращения возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности и эксплуатации железнодорожного транспорта, используют организационную работу по тревожным показаниям средств диагностики КТСМ [12, 13]. При эксплуатационных условиях возникают различные неисправности букс, а именно, самые частые вызванные влиянием внешних условий, механическими деформациями, загрязнением, нарушением технологии изготовления, обслуживания и ремонта грузового подвижного состава [14].

Эксплуатационные условия и внешние факторы, влияющие на буксовый узел

Буксовый узел колесной пары является ответственным узлом в ходовой части подвижного состава и служит для передачи статических и динамических нагрузок на ось колесной пары и обеспечения вращения колесной пары при движении грузового вагона. Буксы воспринимают и передают колесным парам вес кузова, а также динамические нагрузки, возникающие при движении вагона и при прохождении кривых участков пути, стрелочных переводов, стыковых соединений, при торможении колеса, при наличии дефектов на поверхности катания колес. Шейку оси колесной пары от загрязнения и повреждения предохраняют буксовые узлы. Они также являются резервуаром для смазки и местом размещения подшипников [15].

Тяжелые эксплуатационные условия и изменяющиеся внешние факторы – температурные и погодные условия окружающей среды приводят к тому, что буксы должны обеспечивать минимальное сопротивление вращению колесных пар, высокую надежность работы и безопасность движения вагона в целом. Поэтому к их конструкции и расчетам при проектировании, а также к технологическому процессу ремонта предъявляются особые требования [16].

Аппаратура КТСМ (КТСМ–01, КТСМ–01Д, КТСМ–02) по сравнению с прибором обнаружения нагретых букс (ПОНАБ–3) наделена улучшенными эксплуатационными и техническими характеристиками, которые обнаруживают и выявляют перегретые буксы с высокой температурой, работают в интервале наружного воздуха от -60°C до $+55^{\circ}\text{C}$, передают информацию на расстоянии до 40 км. В информации на один проверенный подвижной состав содержатся данные, а именно: количество осей в вагоне, количество и порядковые номера вагонов с перегретыми

буксами с указанием стороны по ходу поезда (левая, правая ось), время начала и окончания контроля, скорость движения поезда во время контроля. Средний срок службы аппаратуры 10 лет [17]. В табл. представлены разновидности тревог для грузовых и пассажирских вагонов с температурным пороговым значением нагрева буксового узла.

Конкретный порядок приема поездов на станцию с неисправными вагонами фиксируется в техническо-распорядительном акте и местной Инструкции.

При выявлении неисправности поезд должен следовать до следующей станции со скоростью не более 40 км/ч. Локомотивная бригада должна следить с особым вниманием за вагоном или вагонами с зафиксированной неисправностью, сведения об этом вагоне (локомотиве), его номер, расположение в поезде, должны быть переданы на ближайшую

станцию через оператора пункта технического обслуживания, где имеются осмотрщики вагонов, для усиления бдительности при встрече поезда для осмотра таких вагонов [18, 19].

Если перед следующей станцией КТСМ не выдал сигнал «ТРЕВОГА-1 (2)», то поезд может следовать без остановки по станции с установленной скоростью. При повторной выдаче перед следующей станцией сигнала «ТРЕВОГА-1 (2)» решение о дальнейшем движении поезда принимается осмотрщиком вагонов.

На рис. 5, 6 приведены результаты наблюдения за критической температурой буксового узла в зависимости от прохождения населенного пункта в четном и нечетном направлениях, представлен участок от 601 км до 1 815,6 км железной дороги. С участков была зафиксирована КТСМ нестабильная температурная зависимость буксового узла, которая

Таблица. Пороговые значения сигнализации для аппаратуры комплекса технических средств многофункционального (КТСМ-02), °С

Table. Threshold values of the equipment for multifunctional complex of technical means (KTCM-02), С

Вид тревоги	Значения температуры в градусах Цельсия						
	Пассажирские поезда	Локомотив	Грузовые поезда				
			Кассета под адаптером	Основные ПТО ⁵	Пониженная настройка ⁶	Промежуточная станция	Повышенная настройка
	Разность температур букс на одной оси (Рось)						
Тревога 0	–	28	40 ⁶	20	25	32	32
Тревога 1	–	36	–	36	33	37	41
Тревога 2	–	40	–	43	40	43	47
	Относительная температура буксы (dT _б) ¹						
Тревога 0	60	50	70				50
Тревога 1	70	60	80				60
Тревога 2	80	70	90				70
	Абсолютная температура (Т _б) ²						
Тревога 2	100						

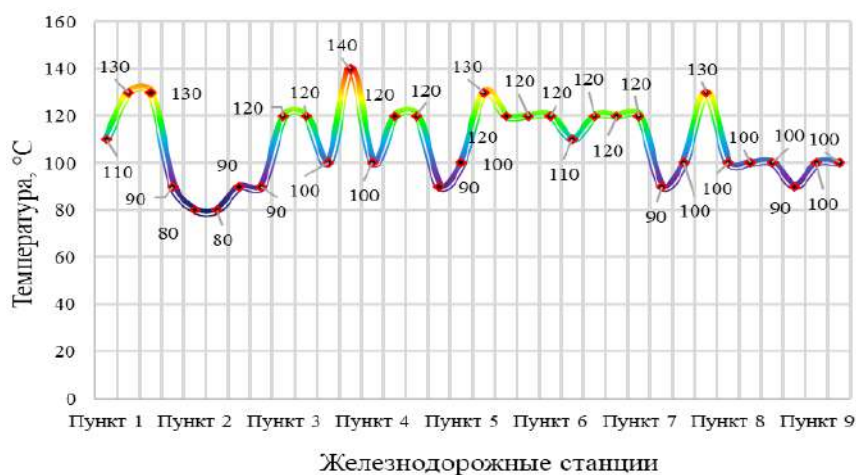


Рис. 5. Зависимость критической температуры от прохождения населенного пункта в четном направлении
Fig. 5. Critical temperature dependence on passing through populated area in even direction

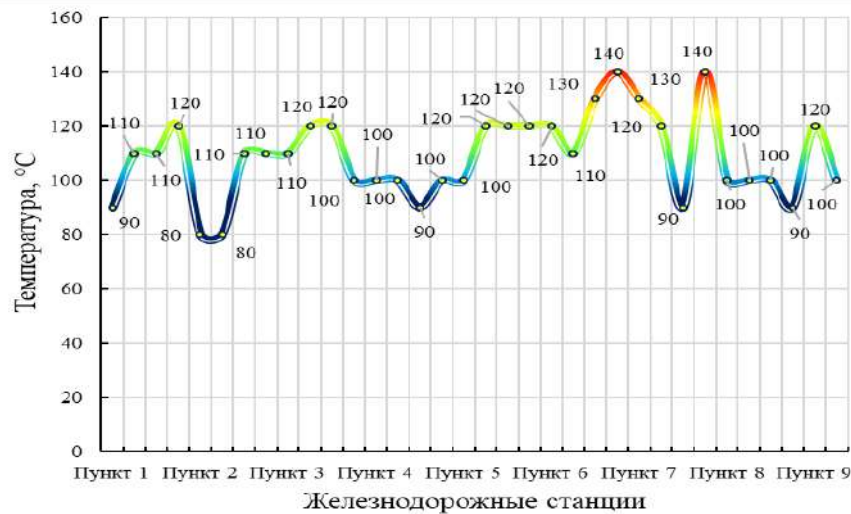


Рис. 6. Зависимость критической температуры от прохождения населенного пункта в нечетном направлении

Fig. 6. Critical temperature dependance on passing through populated area in odd direction

наблюдалась у подвижного состава, следовавшего в четном и нечетном направлениях. Температура буксового узла возрастает в пределах 80–140 °С. При рассмотрении данных, количество срабатываний КТСМ по нагреву буксового узла составило 12: в четном направлении – 8, а в нечетном – 4. При осмотре буксовых узлов количество сократилось до 11: в четном направлении – 7, а в нечетном – 4. Также при осмотре подшипниковых узлов была выявлена разница по длине (≥ 12 мкм) и диаметру (≥ 5 мкм) тел качения (роликов) (рис. 7).

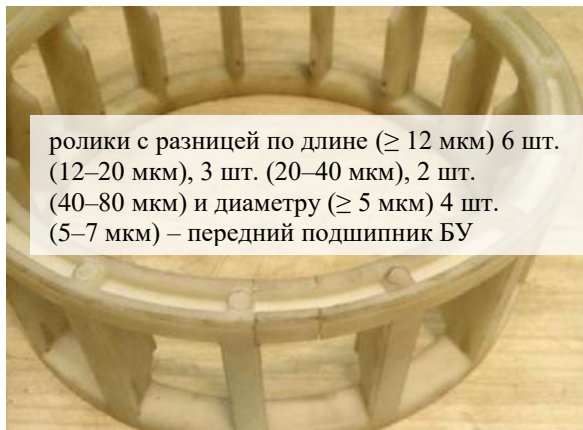
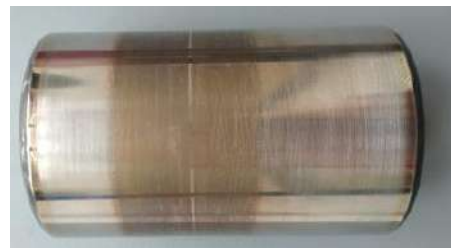


Рис. 7. Дефекты, приводящие к быстрому нагреву до «тревожных» температур

Fig. 7. Defects causing heating to "alarm" temperatures

Превышение допустимой температуры выходящей за пределы нормы вызвана основным фактором – отказ буксового узла, которые представляет угрозу для безопасности движения поездов. Причи-

нами отказа послужили многочисленные факторы, одними из которых являются дефекты металла, «елочки» на телах качения и нарушения технологии напрессовки внутренних колец подшипников, из-за которых в кольцах создаются повышенные остаточные напряжения и приводят к излому колец (рис. 8).



a



б

Рис. 8. Детали подшипников с дефектами, которые являются основными причинами отказов:

a – цвета побежалости; *б* – «елочка» на телах качения

Fig. 8. Parts of bearings being the main reasons for failure: *a* – run off colours, *b* – "herringbone" on rolling bodies

Исходя из особенности организации ремонта колесных пар на сети железных дорог, невозможно

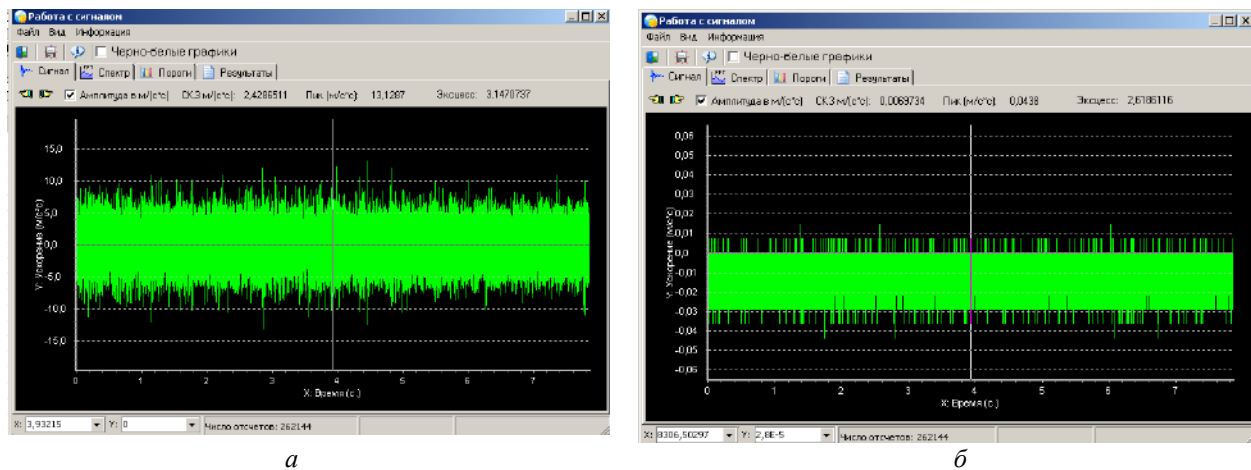
отследить изменение вибрационных параметров одной колесной пары при проведении очередного ремонта, так как возможность попадания ее на это же предприятие крайне мала. Поэтому оценку технического состояния буксовых узлов колесной пары необходимо производить по однократному измерению вибрации. Различить все виды дефектов по однократному измерению вибрации крайне сложно, поэтому дефекты разбиты на группы, с учетом особенностей влияния на вибрацию. Число групп дефектов снижается за счет их объединения с группами дефектов, которые имеют схожие признаки по их проявлению в спектре вибрации и спектре огибающей ее высокочастотной части.

На рис. 9, 10 приведены примеры сигналов и спектров двух колесных пар, одна из которых имеет

дефекты тел качения подшипников, а вторая является полностью исправной. На рис. 10 представлены спектральные пороги исправной и неисправной колесной пары с соответствующими для них таблицами, где представлены возможные дефекты в зависимости от измеренного уровня виброускорения.

Заключение

В статье представлены данные, снятые с автоматизированной системы КТСМ, в виде графиков зависимости температуры нагрева букс с разных участков пути в четном и нечетном направлениях, а также приведены спектральные диаграммы, полученные при проведении вибродиагностики колесных пар. Все полученные данные превышают максимально допустимую температуру нагрева букс, в



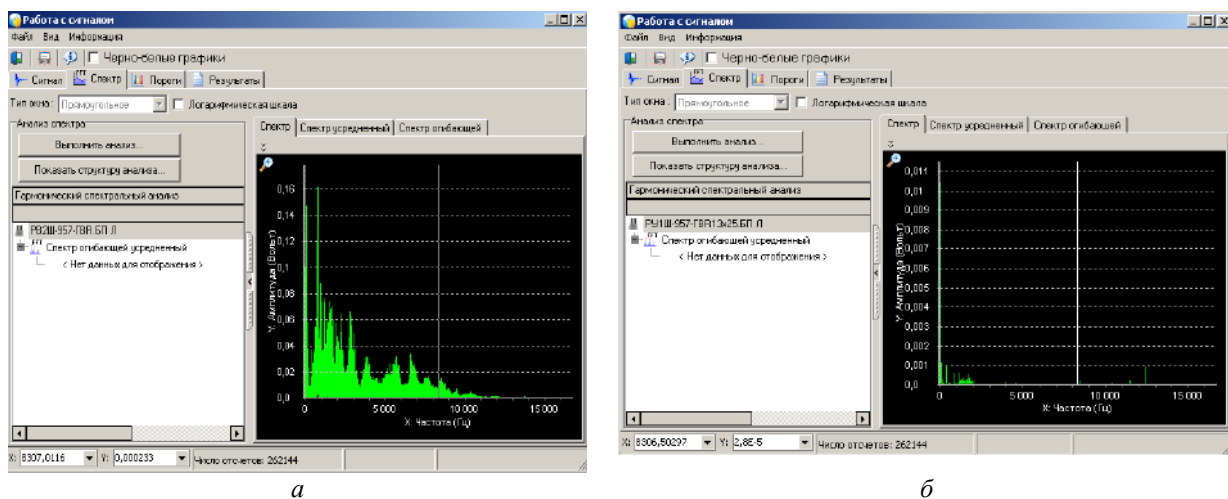
а

б

Рис. 9. Сигнал виброускорения во времени:

а – неисправной колесной пары; б – исправной колесной пары

Fig. 9. Vibration acceleration signal in time: a – defective wheel set, b – functioning wheel set



а

б

Рис. 10. Спектр огибающей:

а – неисправная букса; б – исправная букса

Fig. 10. Enveloping spectre:

a-defective box, b-functioning box

одном подшипнике тела качения имеют разные длины и диаметры, которые превышают норму, что приводит к неправильной работе буксового узла и его заклиниванию. Рассмотренный пример отказа буксового узла может повлечь за собой сход подвижного состава, так как при неправильной работе может произойти сдвиг буксового узла и, соответственно, увеличение и смещение нагрузок на ось и колесо, вследствие чего происходит излом оси, и

боковая рама вместе с буксовым узлом падает на земляное полотно. В практике рассмотрены сходы подвижного состава по данным причинам и процент их достаточно высок. Данные неисправности буксового узла на Восточно-Сибирской железной дороге являются основными и в сочетании с другими неисправностями являются особо опасными не только для конкретного подвижного состава, но и для параллельно движущихся составов.

Список литературы

1. Анализ работы устройств КТСМ и УКСПС на железных дорогах ОАО «РЖД» в 2018 году. М. : Управление автоматизации и телемеханики Центральной Дирекции Инфраструктуры. 2018. 23 с.
2. Анисимов П.С., Лукин В.В., Федосеев Ю.П. Вагоны. Общий курс. М. : Маршрут, 2004. 424 с.
3. Техническая диагностика вагонов : учебник / Р.А. Ахмеджанов и др. ; под ред. Криворудченко В.Ф. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2013. 30 с.
4. Ахмеджанов Р.А., Криворудченко В.Ф. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта : учеб. пособие для вузов ж-д транспорта. М. : Маршрут, 2005. 436 с.
5. Балалаев С.В. Безопасность движения на железных дорогах. Ч. 1. Основы безопасности : учеб. пособие. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2008. 125 с.
6. Бугаев В.П., Гридюшко Н.З., Криворучко В.И. Вагонное хозяйство. М. : Транспорт, 1988. 279 с.
7. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона. М. : Транспорт, 1991. 860 с.
8. Гапанович В.А. Прогрессивные технологии обеспечения безопасности движения поездов и сохранности перевозимых грузов. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2008. 220 с.
9. Технология вагоностроения и ремонта вагонов / В.С. Герасимов, Б.М. Кернич, И.Ф. Скиба и др. М. : Транспорт, 1988. 381 с.
10. Герасимов В.С., Кернич Б.М., Скиба И.Ф. Технология вагоностроения и ремонта вагонов. М. : Транспорт, 2002. 380 с.
11. Двоглазов А.В., Хоперский В.И. Наглядно о структуре КТСМ-02 // Автоматика, связь, информатика. 2010. № 11. С. 31–34.
12. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотрику вагонов) № 808-2017-ПКБ-ЦТ : утв. Советом по ж.-д. трансп. Государств - участников Содружества от 21-22.05.2009 г. № 50. Введ. 01.09.2009.
13. Левин С.В., Хмелев В.Н., Цыганок С.Н. Источники ультразвукового воздействия. Особенности построения и конструкции. Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. 196 с.
14. Лысюк В.С. Причины и механизмы схода колеса с рельса. М. : Транспорт, 2002. 215 с.
15. Руководство по эксплуатации средств контроля: КТСМ-01Д для автоматического обнаружения перегретых букс и заторможенных колесных пар на ходу поезда. Омск, 2002. 18 с.
16. Телевной А.В., Телевной В.А. Технологические процессы повышения конструкционной прочности деталей машин. Омск : ОмГТУ. 1993. 120 с.
17. Вагоны. Конструкция, теория и расчет / Л.А. Шадур, И.И. Челноков, Л.Н. Никольский и др. М. : Транспорт, 1980. 439 с.
18. Шаповалов В.В., Швалов Д.В. Система диагностики подвижного состава. М. : Маршрут, 2005. 268 с.

References

1. Analiz raboty ustrojstv KTSM i UKSPS na zheleznykh dorogakh ОАО «RZHD» v 2018 godu [Analysis of the operation of KTSM and UKSPS devices on the railways of Russian Railways in 2018]. Moscow: Automation and Telemechanics Department of the Central Directorate of Infrastructure, 2018. 23 p.
2. Anisimov P.S., Lukin V.V., Fedoseev Yu.P. Obshhij kurs [Wagons. General Course]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 424 p.
3. Akhmezhdanov RA and others; ed. Krivorudchenko V.F. Tekhnicheskaya diagnostika vagonov [Technical diagnostics of cars]. Moscow: Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2013. 30 p.
4. Akhmedzhanov R.A., Krivorudchenko V.F. Sovremennye metody tekhnicheskoy diagnostiki i nerazrushayushhego kontrolya detalej i uzlov podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta [Modern methods of technical diagnostics and non-destructive testing of parts and components of rolling stock of railway transport]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 436 p.
5. Balalaev S.V. Bezopasnost' dvizheniya na zheleznykh dorogakh. CH.1. Osnovy bezopasnosti [Traffic safety on railways. Part 1. Fundamentals of security]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2008. 125 p.
6. Bugaev V.P., Gridyushko N.Z., Krivoruchko. V.I. Vagonnoe khozyajstvo [Wagon economy]. Moscow: Transport Publ., 1988. 279 p.
7. Vershinsky S.V., Danilov V.N., Khusidov V.D. Dinamika vagona [The dynamics of the car]. Moscow: Transport Publ., 1991, 860 p.
8. Gapanovich V.A. Progressivnyye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov i sokhrannosti perevozimykh грузов [Progressive technologies to ensure the safety of train traffic and the safety of transported goods]. Moscow: Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2008. 220 p.

9. Gerasimov V.S., Kernich B.M., Skiba I.F. Tekhnologiya vagonostroeniya i remonta vagonov [Technology of car building and repair of cars]. M.: Transport Publ., 1988. 381 p.
10. Gerasimov V.S., Kernich B.M., Skiba I.F. Tekhnologiya vagonostroeniya i remonta vagonov [Technology of car building and car repair]. Moscow: Transport Publ., 2002. 380 p.
11. Dvoeglazov A.V., Khopersky V.I. Naglyadno o strukture KTSM–02 [Vividly about the structure of KTSM – 02]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], 2010, No. 11, pp. 31–34.
12. Instruktsiya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu vagonov v ehkspluatatsii (instruktsiya osmotrshhiku vagonov) [Instructions for the maintenance of cars in operation (instructions for the car inspector)]. No. 808-2017-ПКВ-ТсТ.
13. Levin S.V., Khmelev V.N., Tsyganok S.N. Istochniki ul'trazvukovogo vozdejstviya. Osobennosti postroeniya i konstruksii [Sources of ultrasound exposure. Features of construction and construction]. Biysk: Altajskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet Publ., 2013. 196 p.
14. Lysyuk V.S. Prichiny i mekhanizmy skhoda koleasa s rel'sa [Causes and mechanisms of wheel derailment]. Moscow: Transport Publ., 2002. 215 p.
15. Rukovodstvo po ehkspluatatsii sredstv kontrolya: KTSM-01D dlya avtomaticheskogo obnaruzheniya peregretykh buks i zatormozhennykh kolesnykh par na khodu poezda [Operation manual for control devices: KTSM-01D for automatic detection of overheated axle boxes and braked wheelsets on the move]. Omsk, 2002. 18 p.
16. Televnoy A.V., Televnoy V.A. Tekhnologicheskie protsessy povysheniya konstruksionnoj prochnosti detalej mashin [Technological processes of increasing the structural strength of machine parts]. Omsk: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet Publ., 1993. 120 p.
17. Shadur L.A., Chelnokov I.I., Nikol'skij L.N. etc. Vagony. Konstruksiya, teoriya i raschet [Wagons. Design, theory and calculation]. Moscow: Transport Publ., 1980. 439 p.
18. Sharovalov V.V., Shvalov D.V. Sistema diagnostiki podvizhnogo sostava [Rolling stock diagnostic system]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 268 p.

Информация об авторах

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

Information about the authors

Lyubov V. Martynenko – senior lecturer of the Subdepartment railcars and wagon facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ
И ОБРАБОТКА**

**INFORMATION TECHNOLOGY, MANAGEMENT
AND PROCESSING**

Об опыте разработки мобильного приложения вопросов и ответов

А. В. Данеев¹✉, Р. А. Данеев², И. А. Рыжов¹

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

² Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ daneev@mail.ru

Резюме

В работе рассматривается опыт разработки мобильного приложения, предназначенного для вопросов и ответов. Актуальность исследования заключается в том, что интернет стал рассматриваться как большая база знаний, для работы с которой требуются специальные инструменты. Система вопросов и ответов представляет собой сообщество из пользователей, помогающих друг другу в поиске решения конкретной проблемы. Такие системы являются базой знаний, которые хранят в себе вопросы и их решение. Плюс таких систем в том, что, если пользователь ограничен в знаниях в какой-либо области, то ему может помочь человек, разбирающийся в этой сфере. В таких системах существует принцип разделения вопросов на категории, например, наука, философия, психология или автомобили. Современные системы вопросов и ответов – это, как правило, веб-сайт, предназначенный для людей, ищущих решение на свой вопрос. Такие сайты позволяют пользователям задать вопрос или помочь с решением на уже заданные вопросы. Таким образом, формируется социальная сеть, участником которой может стать каждый. Такие социальные сети не только помогают с решением проблемы, но и дают пользователям возможность обмениваться своими знаниями и опытом с другими, а в некоторых случаях искать новые пути решения. Разработанное мобильное приложение является таким инструментом. Оно позволяет организовать базу знаний пользователей и предоставляет удобный поиск вопросов и ответов. Также данное приложение организует небольшую социальную сеть с системой сообщений для общения пользователей. Пользователю не нужно тратить время на поиск интересующего его вопроса в интернете. Такое приложение соответствует установленным требованиям, поддерживается большим количеством устройств, работающих на операционной системе Android. Реализованная в мобильном приложении система аутентификации обеспечивает необходимую безопасность доступа к возможностям приложения.

Ключевые слова

мобильное приложение, сеть Интернет, поиск информации, база знаний, социальная сеть

Для цитирования

Данеев А. В. Об опыте разработки мобильного приложения вопросов и ответов / А. В. Данеев, Р. А. Данеев, И. А. Рыжов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 202–211. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).202-211

Информация о статье

поступила в редакцию: 22.07.2021, поступила после рецензирования: 19.08.2021, принята к публикации: 03.09.2021

On the experience in developing mobile application "questions and answers"

A. V. Daneev¹✉, R. A. Daneev², I. A. Ryzhov¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Irkutsk, the Russian Federation

✉ daneev@mail.ru

Abstract

The paper discusses the experience of developing a mobile application of questions and answers. The relevance of this work lies in the fact that the Internet has come to be seen as a large knowledge base, which requires special tools. The system of questions and answers is a community of users helping each other in finding a solution to their problem. Such systems are a knowledge base that stores problems and their solutions. The advantage of such systems is that if the user is limited in knowledge in any area, then a person who understands this area can help him. In such systems, there is a principle of dividing questions into categories, for example, science, philosophy, psychology or cars. Modern question and answer systems are usually a website consisting of people looking for a solution to their questions. Such sites allow users to ask a question or help with the solution to questions already asked. This is how a social network is formed, which everyone can become a member of. Such social networks not only help with solving problems, but also give users the opportunity to share their knowledge and experience with others. And in some cases, look for new solutions. The developed mobile application is such a tool. It allows you to organize the user knowledge base and provides a convenient search for questions and answers. Also, this application organizes a small social network with a message system for users to communicate. Users do not need to waste time searching the Internet for a question of interest. Such an application meets the established requirements and is supported by a large number of devices running on the Android operating system. The authentication system implemented in the mobile application provides the necessary security for access to the application's resources.

Keywords

mobile application, Internet, information search, knowledge base, social network

For citation

Daneev A. V., Daneev R. A., Ryzhov I. A. Ob opyte razrabotki mobil'nogo prilozheniya voprosov i otvetov [On the experience in developing mobile application "questions and answers"]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 202–211. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).202-211

Article info

Received: 22.07.2021, Revised: 19.08.2021, Accepted: 03.09.2021

Введение

В последние годы наблюдается бурный рост объема общедоступной информации. Вследствие чего в современном обществе появилась проблема поиска и получения нужной информации. Эту проблему усугубляет и то, что в настоящее время информация, доступная в сети Интернет, имеет очень высокий уровень динамики. В каждый момент времени появляются новые материалы и факты. Постоянный рост объема информационных массивов и их обновление делают сложным, а зачастую практически невозможным учет всей информации. По причине этого данные, представляющие ценность, частую остаются невостребованными.

В XXI в. деятельность людей, коллективов, организаций и компаний в большей степени зависит от имеющейся у них информации, а также способности быстро ее найти. Имея доступ к представленной в сети Интернет информации, пользователю хотелось бы получать только нужную ее часть, в то время как поисковые системы представляют для этого малые возможности. Пользователю приходится самому продолжать искать информацию среди той, что ему предлагается, что затрудняет ее восприятие. Таким образом, получается противоречие между большим количеством доступной информации и ограниченными возможностями по ее поиску.

Когда мы хотим что-то узнать, мы спрашиваем – задаем вопрос, что, в общем-то, естественно в процессе познания. Большинство систем по поиску информации не имеют возможности отвечать на наши вопросы. Для поиска и получения человеку нужно сформировать запрос из ключевых слов и задать его поисковой машине.

В последнее время повысился интерес к разработке интеллектуальных и нетрадиционных механизмов поиска и получения информации. Интернет стал рассматриваться как потенциальный большой источник знаний, для работы с которой требуются специальные инструменты. Сегодня термин «информационный поиск» (англ. Information retrieval) включает в себя поиск текстовых документов, изображений, видео, многоязыковой поиск, географически-зависимый поиск. Помимо этого к информационному поиску можно причислить и поиск ответа на вопрос. В последние годы увеличилось количество

проектов таких систем в данной области [1–9], например, сервис вопросов и ответов «Яндекс.Кью».

Описание предметной области

Система вопросов и ответов представляет собой сообщество из пользователей, помогающих друг другу в поиске решения конкретной проблемы. Такие системы являются базой знаний, которые хранят в себе вопросы и их решение. Плюс таких систем в том, что, если пользователь ограничен в знаниях в какой-либо области, то ему может помочь человек, разбирающийся в этой сфере. В таких системах существует принцип разделения вопросов на категории, например, наука, философия, психология или автомобили.

Современные системы вопросов и ответов – это, как правило, веб-сайт, на котором люди ищут решение своих вопросов. Такие сайты позволяют пользователям задать вопрос или помочь с решением на уже заданные вопросы. Таким образом, формируется социальная сеть, участником которой может стать каждый. Такие социальные сети не только помогают с решением проблемы, но и дают пользователям возможность обмениваться своими знаниями и опытом с другими, а в некоторых случаях искать новые пути решения.

Для разработанного мобильного приложения необходимо, чтобы мобильное устройство соответствовало следующим техническим характеристикам:

- ОС Android 5.1 +;
- оперативная память не менее 1 Гб;
- объем встроенной памяти 100 Мб;
- постоянный доступ к Интернету.

Программа поставляется в виде установочного файла формата .apk. В будущем приложение может быть размещено в магазине приложений Play Market. Для разработки приложения была выбрана среда разработки Visual Studio Code – редактор исходного кода, разработанный Microsoft для Windows, Linux и macOS.

Описание взаимодействия пользователя с приложением

Взаимодействие пользователя с приложением происходит в соответствии с рис. 1, 2.

Просмотр информации о приложении. Пользователь, находясь на экране авторизации, может

ознакомиться с информацией о приложении, нажав на соответствующую кнопку «О приложении». Если пользователь авторизован, с данной информацией можно ознакомиться через настройки профиля пользователя.

Просмотр справки «Как взаимодействовать с приложением». Пользователь, находясь на главном экране, может нажать на соответствующую кнопку – «знак вопроса» – для просмотра помощника по взаимодействию с приложением.

Создание поста с вопросом. Пользователь может создать пост с вопросом при нажатии на соответствующую кнопку – «знак плюса» – на нижней панели навигации приложения. На экране создания вопроса необходимо выбрать категорию и заполнить обязательные поля вопроса: тема вопроса, описание проблемы. Также пользователь может, если это необходимо, прикрепить к вопросу фотографию или документ. Когда вопрос сформирован, необходимо нажать на кнопку «Опубликовать». После этого созданный вопрос появится на главном экране приложения, и другие пользователи могут помочь с проблемой.

Редактирование поста с вопросом. Пользователь может отредактировать свой опубликованный вопрос, выбрав из списка своих вопросов необходимый и нажав на соответствующую кнопку – «знак

редактирования». На экране редактирования изменить необходимые элементы поста вопроса и нажать на кнопку «Сохранить».

Поиск поста с вопросом. Пользователь выполняет поиск необходимого вопроса по базе. При нажатии на соответствующую кнопку – «знак лупа» – на панели навигации в поле вводится необходимая информация, далее выводится список совпадений.

Просмотр постов по категориям. Пользователь, находясь на главном экране приложения, нажимает на кнопку «знак списка» со списком категорий и выбирает нужную. После чего знакомится с постами данной категории.

Просмотр поста с вопросом. Пользователь на главном экране выбирает интересующий его вопрос.

Добавление поста с вопросом в избранное. Пользователь, находясь на главном экране, может добавить в избранное пост, нажав на соответствующую кнопку – «знак сердца» – под ним.

Отметить ответ как решение вопроса. Пользователь при просмотре своего поста и ответов к нему, выбирает ответ как решение вопроса, нажав на соответствующую кнопку – «знак большой палец вверх». После чего на посте с вопросом появится индикатор, что вопрос решен. Пользователь может отменить действие, нажав на кнопку еще раз.



Рис. 1. Диаграмма сценариев (первая часть)

Fig. 1. Scenario diagram (first part)

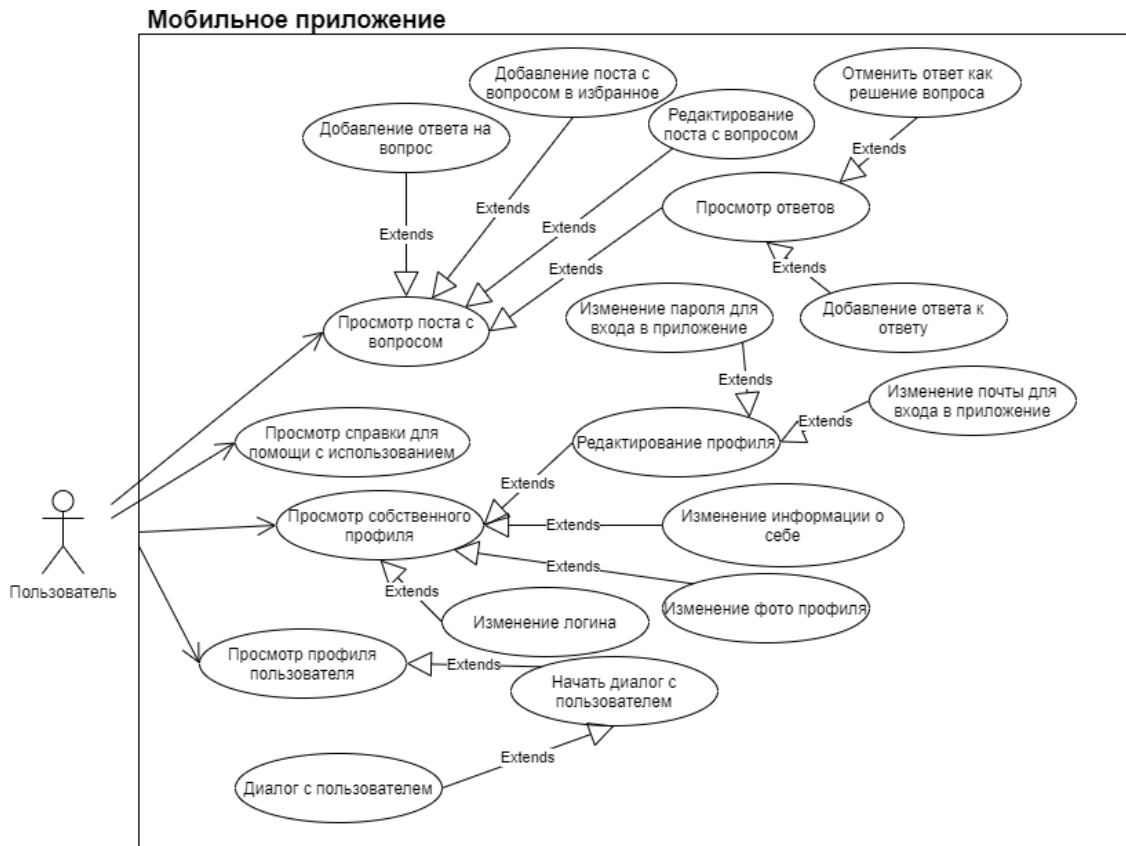


Рис. 2. Диаграмма сценариев (вторая часть)

Fig. 2. Scenario diagram (second part)

Просмотр решения поста с вопросом. Пользователь при просмотре постов может нажать кнопку статуса поста, если она имеется. И на экране будет отображен пост с решением.

Просмотр избранного поста с вопросом. Пользователь может нажать в верхней части главного экрана на кнопку избранных постов – «знак сердца». И на экране со списком избранных постов, выбрать тот, который его интересует.

Просмотр собственного поста с вопросом. Пользователь в своем профиле может нажать на кнопку «собственные посты». И на экране со списком постов, выбрать необходимый для просмотра пост.

Добавление ответа на вопрос. Пользователь при просмотре вопроса может помочь другому пользователю с вопросом при нажатии на соответствующую кнопку – «Ответить». На экране создания ответа необходимо заполнить поле ответа. И при необходимости можно прикрепить фотографию или документ. После формирования ответа необходимо нажать на кнопку «Добавить» и ответ на вопрос появится в комментариях к посту вопроса.

Просмотр ответов. Пользователь при просмотре вопроса знакомится с ответами, нажав на кнопку «Комментарии». Также, в случае необходи-

мости, предусмотрено добавление ответа к ответу, что позволяет пользователям вступать в диалог с другими пользователями.

Добавление ответа к ответу. Пользователь при необходимости может ответить на ответ, нажав на соответствующую кнопку – «Ответить», и предварительно заполнив поле для добавления ответа.

Редактирование профиля. Пользователь, находясь на экране профиля, может отредактировать свой профиль, нажав на соответствующую кнопку – «знак редактирования» рядом с элементом, который он хочет изменить, например, логин, информацию о себе или фото профиля.

Просмотр собственного профиля. Пользователь может открыть свой профиль и ознакомиться со своей информацией при нажатии на соответствующую кнопку на панели навигации.

Просмотр профиля пользователя. Пользователь при просмотре постов, комментариев нажимает на фото пользователя, знакомясь с профилем после перехода на новый экран.

Добавление быстрого ответа на пост с вопросом. Пользователь может добавить быстрый ответ к посту с вопросом, нажав на соответствующую кнопку – «Ответить» – в блоке поста.

Изменение почты для входа в приложение. Пользователь в настройках профиля может изменить почту для входа в приложение. Предварительно подтвердив старую почту и введя новую.

Изменение пароля для входа в приложение. Пользователь в настройках профиля изменяет пароль для входа в приложение. Введя почту профиля и получив письмо со сбросом пароля на почту.

Начать диалог с пользователем. Пользователь при просмотре профиля другого пользователя может начать диалог с ним, нажав на соответствующую кнопку – «Написать сообщение».

Просмотр диалога. Пользователь, перейдя через панель навигации на экран списка диалогов, выбирает необходимый диалог и переходит к просмотру.

Диалог с пользователем. Пользователь при просмотре диалога с другим пользователем может вводить в соответствующее поле текст сообщения и вести диалог с ним.

Авторизация. Пользователю для входа в приложение необходимо ввести почту и пароль.

Восстановление пароля. Если пользователь по какой-либо причине потерял пароль, он восстанавливает его, перейдя на соответствующий экран.

Регистрация пользователя. Если пользователь использует приложение впервые, ему необходимо зарегистрироваться, перейдя на форму регистрации, нажав на соответствующую кнопку. На форме регистрации заполняются обязательные поля: логин, почта, пароль. При желании можно также установить фото профиля.

Архитектура мобильного приложения

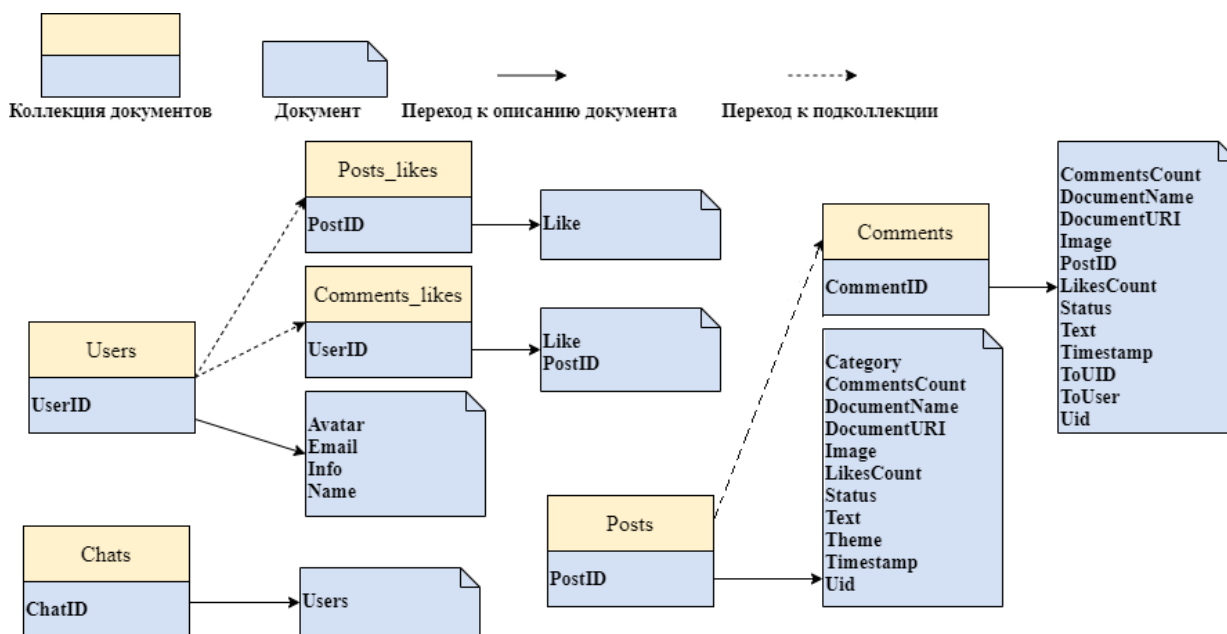


Рис. 3. Схема базы данных Firestore

Fig. 3. Firestore Database Schema

Приложение вопросов и ответов является клиент-серверным приложением. В качестве клиента выступает приложение для Android. Клиент не взаимодействует с базой данных напрямую, так же он не содержит большого количества бизнес-логики. Клиент отвечает за получение и отображение данных, полученных с сервера. Так же клиент отвечает за отправку полученных от пользователя данных, или выполняет запрос к данным по команде пользователя. Взаимодействие с сервером осуществляется через HTTP запросы и ответы. На сервере сосредоточена основная часть бизнес-логики. Он предоставляет клиенту набор методов API, через которые можно передавать и получать данные. Также он осуществляет обработку получаемой информации от клиента и обеспечивает взаимодействие между разными пользователями приложения.

Серверная часть приложения

Для реализации серверной части приложения использовалась облачная платформа Firebase. В разработанном приложении используются следующие компоненты Firebase:

- Firebase Authentication – для аутентификации пользователей в приложении;
- Cloud Firestore – NoSQL база данных – необходима для хранения вопросов, ответов, информации пользователей (логина, персональных данных);
- Firebase Realtime – это облачная база данных (данные хранятся в формате JSON и синхронизируются в режиме реального времени с каждым подключенным клиентом), используется для хранения диалогов пользователей;

– Cloud Storage – облачное хранилище – используется для хранения фотографий, документов и фотографий профилей пользователей.

База данных Cloud Firestore. В схеме базы данных приложения представлены четыре коллекции: category, posts, chats, users, которые содержат документы с информацией о постах с вопросами, их категориях, диалогов и пользователях соответственно (рис. 3).

База данных Realtime Database. В схеме базы данных приложения представлена коллекция chats, которая содержит коллекцию диалогов (рис. 4). Коллекция Chats содержит документы диалогов, в которых хранятся документы сообщений. Внутри каждого документа сообщения хранится объект User с информацией о пользователе-отправителе.

Хранилище файлов Cloud Storage. В схеме хранилища файлов приложения представлены четыре папки для хранения: avatars, comments, documents, photos, которые содержат документы и фотографии, публикуемые пользователями приложения (рис. 5).

Реализация мобильного приложения

Подключение к серверу Firebase. Для начала работы с аутентификацией, базами данных, облач-

ным хранилищем и облачными функциями необходимо установить соединение с сервером Firebase. В разрабатываемом приложении с помощью пакетного менеджера Node.js нужно установить Firebase JavaScript SDK через следующую команду: `npm i firebase`. После чего импортировать его в проект через кодовую строку: `require('firebase')`.

В веб-интерфейсе Firebase необходимо создать проект разрабатываемого приложения. После чего в созданном проекте получить объект конфигурации для создания соединения с Firebase (рис. 6). Данный объект конфигурации внедряется программным кодом мобильного приложения (рис. 7).

Аутентификация. В приложении используется аутентификация по электронной почте и паролю. Для включения функции аутентификации по почте необходимо активировать эту опцию в веб-сервисе Firebase. Когда пользователь входит в приложение или регистрируется, он становится текущим пользователем экземпляра Auth. Экземпляр сохраняет состояние пользователя, поэтому при перезапуске приложения информация пользователя не теряется. Когда пользователь выходит из приложения, экземпляр Auth перестает хранить ссылку на пользовательский объект и больше не сохраняет его состояние.

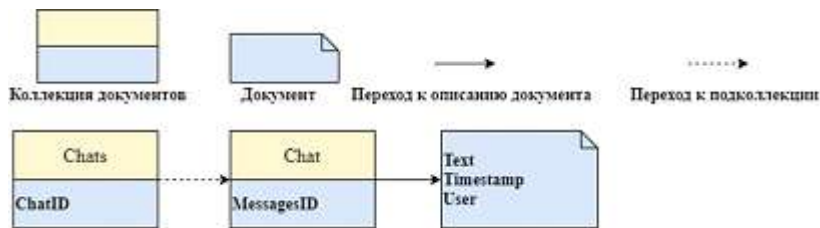


Рис. 4. Схема базы данных Realtime Database

Fig. 4. Real time Database Schema

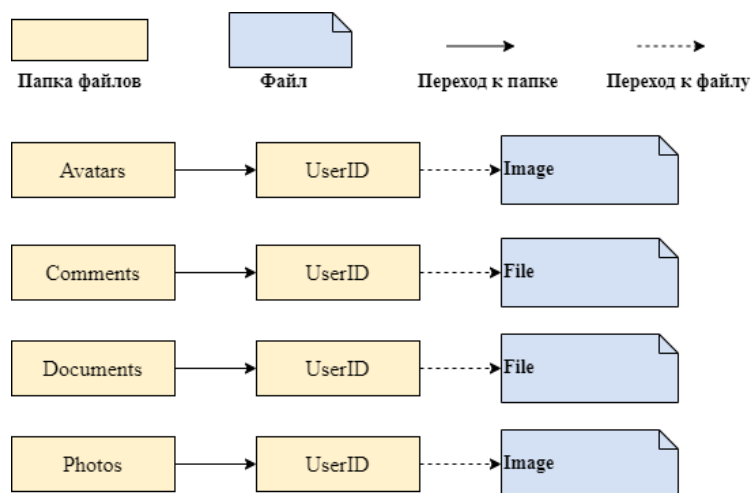


Рис. 5. Схема хранилища файлов

Fig. 5. File storage scheme

```
var firebaseConfig = {
  apiKey : "AIzaSyDOCAbC123dEf456GhI789jKl01-Mn0" ,
  authDomain : "myapp-project-123.firebaseio.com" ,
  databaseURL : "https://myapp-project-123.firebaseio.com" ,
  projectId : "myapp-project-123" ,
  storageBucket : "myapp-project-123.appspot.com" ,
  messagingSenderId : "65211879809" ,
  appId : "1: 65211879909: веб: 3ae38ef1cddb2e01fe5f0c" ,
  Идентификатор измерения : "G-8GSGZQ44ST"
};
```

Рис. 6. Объект конфигурации Firebase
Fig. 6. Firebase Configuration Object

```
if (!firebase.apps.length) {
  firebase.initializeApp(FirebaseKeys);
}
```

Рис. 7. Программный код инициализации
подключения к серверу Firebase
Fig. 7. Program code for initializing the
connection to the Firebase server

Авторизация. Для авторизации в приложении используется метод `firebase.auth().signInWithEmailAndPassword(email, password)`. При нажатии на кнопку «Войти» вызывается метод, который отправляет введенные данные: почту и пароль. Firebase Authentication проверяет правильность полученных данных и возвращает ответ, токен доступа или ошибка входа.

Работа с файлами через мобильное приложение. Для возможности добавить картинку используется компонент `ImagePicker`, который импортирует через программный код: `import * as ImagePicker from 'expo-image-picker'`. При нажатии на иконку добавления фотографии вызывается функция `pickImage`. Данный компонент имеет настройки типа медиа файлов, возможность редактирования, соотношение сторон и другие. `ImagePicker`, предоставляет пользователю выбрать, через какое приложение добавить фотографию.

Для добавления файла используется компонент `DocumentPicker`, который импортирует через программный код: `import * as DocumentPicker from 'expo-document-picker'`. При нажатии на иконку добавления документа вызывается функция `pickDocument`. `DocumentPicker` предоставляет пользователю выбрать необходимый файл из памяти телефона. После выбора файла компонент `DocumentPicker` возвращает объект с информацией о файле, такие параметры как имя и путь записываются в состояние компонента приложения для загрузки в облачное хранилище.

При нажатии на кнопку «Написать сообщение» на сервер отправляется запрос вида: `collection('chats').where('users', 'array-contains', userID).get()`.

Данный запрос отправляется в базу данных Cloud Firestore в коллекцию чатов для проверки существования диалогов пользователя. Если диалоги существуют, то он вернет список из уникальных идентификаторов диалогов. Запрос к Cloud Firebase не позволяет делать сложную выборку из коллекции, поэтому список диалогов обрабатывается на стороне клиента. Список фильтруется на соответствие состава из двух конкретных пользователей диалога. Если он существует, то список сообщений загрузится из базы данных. Для создания диалога нужно чтобы один из пользователей отправил сообщение собеседнику. После отправки сообщения будет сгенерирован уникальный документ диалога с массивом пользователей: `collection('chats').doc().set({users: [userID, user Companion]})`.

Для реализации поиска постов с вопросами в приложении используются Cloud Functions – облачные функции Firebase и интеграция в приложение поисковой системы Algolia.

Для подключения необходимых пакетов используется пакетный менеджер Node.js. Для реализации поиска потребуется скачать пакет для взаимодействия с Cloud Functions с помощью команды: `npm firebase-functions`. Для интеграции поисковой системы Algolia также потребуется пакет, который скачивается с помощью `npm algoliasearch`.

За отображение списка постов отвечает компонент `Flatlist`. Этот компонент имеет множество свойств, такие как `data`, `initialNumToRender`, `renderItem`, `onRefresh`. `Data` – данные для отрисовки, список элементов. `InitialNumToRender` – список отрисовывается после получения определенного количества элементов, используется для оптимизации,

чтобы не дожидаться полного получения списка элементов. `RenderItem` – задается разметка для рендеринга элемента списка. Для обновления списка используется жест «потягивание списка вниз», который запускает функцию обновления списка, указанную в свойстве `OnRefresh`.

Описание работы интерфейса мобильного приложения

Регистрация, восстановление доступа и аутентификация пользователей. При первом запуске приложения пользователя встречает привет-

ственный экран с формой входа (рис. 8). Если у пользователя уже существует аккаунт, и он авторизован, то он увидит экран главной страницы приложения без повторной авторизации. Для новых пользователей существует регистрация (рис. 8). При регистрации пользователь может установить фото профиля. Для восстановления доступа к приложению нужно заполнить поле привязанной почты и подтвердить действие. После чего на почту придет письмо со ссылкой сброса пароля. Если при входе, восстановлении доступа или регистрации возникнут проблемы, приложение выдаст ошибку.

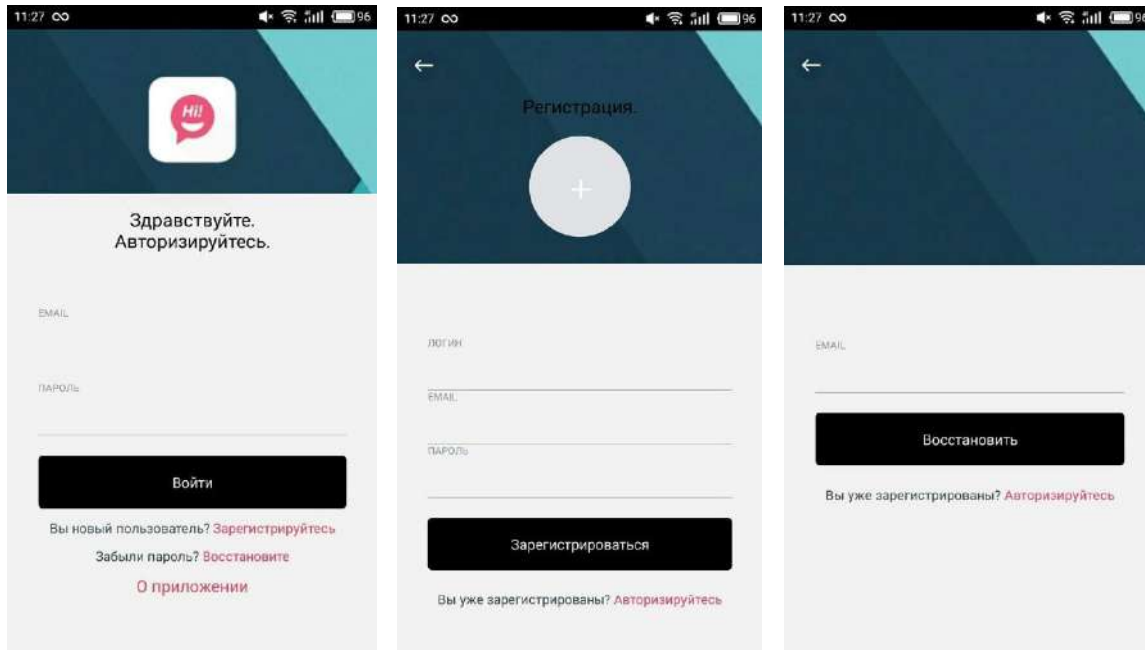


Рис. 8. Начальные экраны приложения

Fig. 8. Application Start Screens

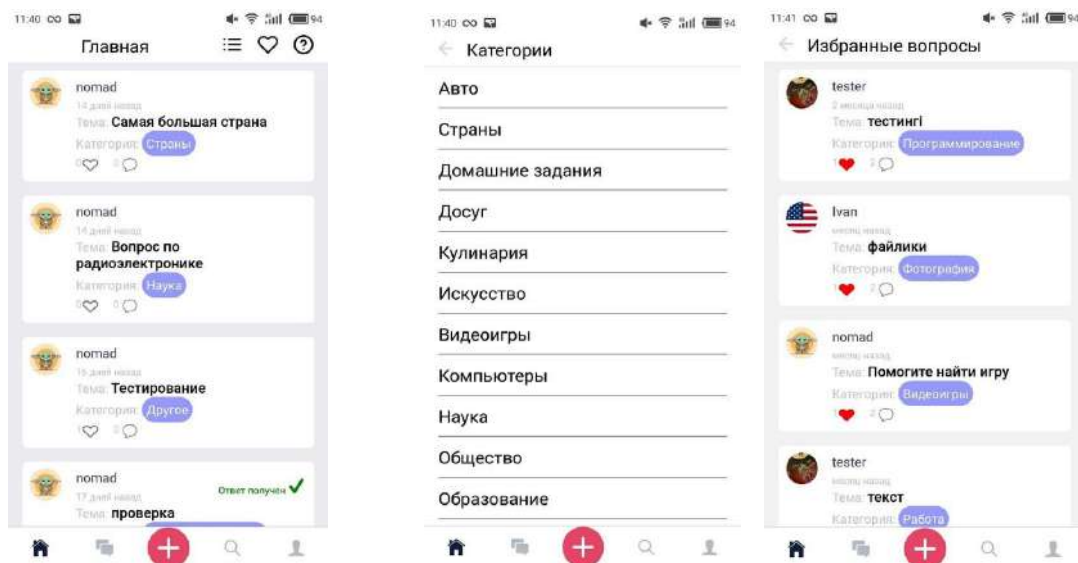


Рис. 9. Главный экран приложения и его работа

Fig. 9. The main screen of the application and its operation

Главный экран приложения. После успешного входа в приложение пользователя приветствует главный экран приложения (рис. 9). В верхней части приложения (заголовок) слева направо располагаются название экрана приложения, кнопка просмотра категорий, кнопка просмотра постов с вопросами добавленных в избранное, кнопка просмотра краткой информации как взаимодействовать с приложением. Для добавления поста с вопросом в избранное нужно просто нажать на кнопку в виде «сердца», после добавления «сердце» поменяется свой цвет на красный. Для удаления достаточно проделать те же самые действия. Посты с вопросами имеют счетчики с количеством добавлений в избранное и количеством ответов. Для добавления ответа достаточно нажать на соседнюю кнопку – «комментарий» – рядом с «сердцем».

Заключение

В статье дано описание мобильного приложения для создания и поиска вопросов на различные темы и получения ответов для операционной системы Android. Приложение поддерживается большинством устройств, является актуальным и полезным в повседневных задачах пользователей. Реализованная в мобильном приложении система аутентификации обеспечивает необходимую безопасность доступа к возможностям приложения. В работах [9–18] приведены авторские свидетельства, учебные пособия и статьи, в которых рассматриваются смежные вопросы.

Список литературы

1. Хэррон Д. Разработка серверных веб-приложений на Javascript / Хэррон Дэвид. ДМК Пресс, 2012. 144 с.
2. Томас М.Т. React в действии / М.Т. Томас, Питер, 2019. 368 с.
3. React Native Documentation // React Native. URL: <https://reactnative.dev/docs/getting-started> (дата обращения 02.05.2020).
4. Flux: Архитектура приложения на React.js – всестороннее исследование // Medium. URL: <https://medium.com/@marina.kovalyova/flux-the-react-js-application-architecture-773f515d068d> (дата обращения 02.05.2020).
5. Firebase Authentication Documentation // Firebase. URL: <https://firebase.google.com/docs/auth> (дата обращения 02.05.2020).
6. Firebase Realtime Database Documentation // Firebase. URL: <https://firebase.google.com/docs/database> (дата обращения 02.05.2020).
7. Firebase Cloud Firestore Documentation // Firebase. URL: <https://firebase.google.com/docs/firestore> (дата обращения 02.05.2020).
8. Firebase Storage Documentation // Firebase. URL: <https://firebase.google.com/docs/storage> (дата обращения 02.05.2020).
9. Firebase Cloud Functions Documentation // Firebase. URL: <https://firebase.google.com/docs/functions> (дата обращения 02.05.2020).
10. Algolia Search Documentation // Algolia. URL: <https://www.algolia.com/doc/guides/building-search-ui/installation/react/> (дата обращения 02.05.2020).
11. Node.js Documentation // Node.js. URL: <https://nodejs.org/en/docs/> (дата обращения 10.05.2020).
12. NPM Documentation // npmjs. URL: <https://docs.npmjs.com/> (дата обращения 10.05.2020).
13. Паттерны разработки: MVC vs MVP vs MVVM // Habr. URL: <https://habr.com/ru/post/344184/> (дата обращения 10.05.2020).
14. Мобильное приложение для Multi-Vendor: Вопросы и ответы. URL: https://www.cs-cart.ru/docs/latest/user_guide/mobile_app/faq.html (дата обращения 10.05.2020).
15. Данеев А.В., Данеев Р. А., Диомидов И.А. Разработка геоинформационной системы в сфере лесоустройства // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2020. № 3 (8). С. 89–98.
16. А.С. № 2020662976 от 21.10.2020 Рос. Федерация. Мобильное приложение вопросов и ответов / Рыжов И.А., Данеев А.В., Данеев Р.А.
17. А.С. № 2020663581 от 29.10.2020 Рос. Федерация. Геоинформационная система для предприятия в сфере лесоустройства «ГИСЛЕС» / Диомидов И.А., Данеев А.В., Данеев Р.А.
18. Данеев А.В., Ермакова Н.М. Программа тестирования и обучения // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. Вып. 19. Иркутск: ИрГУПС, 2017. С. 142–146.

References

1. Harron D. Development of server-side web applications in Javascript. DMK Press, 2012. 144 p.
2. Thomas M.T. React in action. Peter, 2019. 368 p.
3. React Native Documentation. React Native. URL: <https://reactnative.dev/docs/getting-started> (accessed 05/02/2020).
4. Flux: React.js Application Architecture – A Comprehensive Study // Medium. URL: <https://medium.com/@marina.kovalyova/flux-the-react-js-application-architecture-773f515d068d> (date circulation 05/02/2020).
5. Firebase Authentication Documentation. Firebase. URL: <https://firebase.google.com/docs/auth> (date of treatment 05/02/2020).

6. Firebase Realtime Database Documentation. Firebase. URL: <https://firebase.google.com/docs/database> (accessed 02.05.2020).
7. Firebase Cloud Firestore Documentation. Firebase. URL: <https://firebase.google.com/docs/firestore> (accessed 02.05.2020).
8. Firebase Storage Documentations. Firebase. URL: <https://firebase.google.com/docs/storage> (accessed 02.05.2020).
9. Firebase Cloud Functions Documentation. Firebase. URL: <https://firebase.google.com/docs/functions> (accessed 02.05.2020).
10. Algolia Search Documentation. Algolia. URL: <https://www.algolia.com/doc/guides/building-search-ui/installation/react/> (date of access 05/02/2020).
11. Node.js Documentation. Node.js. URL: <https://nodejs.org/en/docs/> (date of access 05/10/2020).
12. NPM Documentation. npmjs. URL: <https://docs.npmjs.com/> (accessed 10.05.2020).
13. Development patterns: MVC vs MVP vs MVVM // Habr. URL: <https://habr.com/ru/post/344184/> (accessed 10.05.2020).
14. Mobile application for Multi-Vendor: Questions and Answers. URL: https://www.cs-cart.ru/docs/latest/user_guide/mobile_app/faq.html (accessed 10.05.2020).
15. Daneev A.V., Daneev R.A., Diomidov I.A. Razrabotka geoinformatsionnoj sistemy v sfere lesoustrojstva [Development of a geoinformation system in the field of forest management]. *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami* [Information technologies and mathematical modeling in the management of complex systems], 2020, No. 8, pp. 89–98.
16. A.S. No. 2020662976 of 21.10.2020 Ros. Federation. Mobil'noe prilozhenie voprosov i otvetov [Mobile application of questions and answers]. Ryzhov I.A., Daneev A.V., Daneev R.A.
17. A.S. No. 2020663581 of 29.10.2020 Ros. Federation. Geoinformatsionnaya sistema dlya predpriyatiya v sfere lesoustrojstva «GISLES» [Geoinformation system for the enterprise in the field of forest management "GISLES"]. Diomidov I. A., Daneev A.V., Daneev R. A.
18. Daneev A.V., Ermakova N. M. Programma testirovaniya i obucheniya [Program of testing and training]. *Informatsionnye tekhnologii i problemy matematicheskogo modelirovaniya slozhnykh sistem* [Information technologies and problems of mathematical modeling of complex systems], 2017, Vol. 19, pp. 142–146.

Информация об авторах

Данеев Алексей Васильевич – д-р техн. наук, проф. кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: daneeev@mail.ru

Данеев Роман Алексеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры информационно-правовых дисциплин, Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск, e-mail: romasun@mail.ru

Рыжов Иван Алексеевич – Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: nomad38note@gmail.com

Information about the authors

Alexey V. Daneev – Doctor of Engineering Science, Professor, the Subdepartment Information systems and information security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: daneeev@mail.ru

Roman A. Daneev – Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, the Subdepartment Subdepartment Information-Legal disciplines, East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Irkutsk, e-mail: romasun@mail.ru

Ivan A. Ryzhov – the Subdepartment Information systems and information security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: nomad38note@gmail.com

**ЦВИК ЛЕВ БЕРКОВИЧ****Доктор технических наук, доцент**

Лев Беркович родился 11 февраля 1944 года в Ленинграде, где в 1961 году окончил школу, а в 1967 году Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина, получив диплом инженера-физика по специальности «Динамика и прочность машин». По окончании института Лев Беркович был направлен в Иркутск и был принят на работу в ИркутскНИИхиммаш в лабораторию прочности многослойных сосудов сначала в качестве младшего, а затем старшего научного сотрудника. В институте Лев Беркович принял участие в разработке конструкций, методов испытаний и расчётов на прочность аппаратов высокого давления, получивших широкое применение в химической промышленности СССР. Он является автором нескольких изобретений, внедренных в практику конструирования и испытания таких аппаратов.

В 1975 году, обобщая работы, выполненные в ИркутскНИИхиммаше, Лев Беркович сформулировал новый принцип расчета физического состояния сложных систем: принцип поочередной непрерывности при решении задач теории поля по частям (работа с таким названием опубликована им в журнале «Доклады академии наук СССР»), а также доказал соответствующие теоремы сходимости предложенных вычислительных процессов. В настоящее время указанный подход применяется для распараллеливания вычислений при использовании вычислительной техники, используется при разработке газотурбинных двигателей и некоторых других видов оружейной техники, при оценке температурных полей в тепловыделяющих элементах ядерных реакторов, и даже в медицине при оценке механических повреждений, связанных с черепно-мозговыми травмами.

Лев Беркович является автором свыше ста научных работ, в том числе автором научных монографий, учебно-методических изданий и соавтором справочника по расчету химических аппаратов высокого давления.

В 1980 году Лев Беркович становится кандидатом физико-математических наук по специальности «Механика деформируемого твердого тела», а в 1989 году переходит на работу в отдел автоматизации и технической физики ИНЦ СО РАН сначала в качестве старшего научного сотрудника, а затем заведующего лабораторией математического моделирования.

В 1999 году Лев Беркович поступает в докторантуру ИрГУПС, став первым ее докторантом (его научный консультант – Пётр Иванович Остроменский, заведующий кафедрой теоретической механики ИрГУПС), а в 2002 году становится первым доктором технических наук университета по специальности «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Работая на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство», Лев Беркович предложил ряд эффективных математических моделей конструктивных элементов подвижного состава, а также методов их совершенствования. В частности, им предложены новые профили цельнокатаных колес подвижного состава железных дорог, оптимизированные по критерию их долговечности, а также новые решения для конструктивных элементов буксового узла – одного из наиболее уязвимых конструктивных узлов ходовой части подвижного состава.

Работы, осуществляемые в настоящее время Львом Берковичем, по оценке конструкционной прочности деталей машин различного назначения позволяют существенно сократить цикл их проектирования и испытания на прочность. Указанные работы получили международное признание и защищены несколькими патентами на изобретения.

Лев Беркович для студентов, обучающихся на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство», преподает дисциплины, связанные со строительной механикой вагона, с компьютерными технологиями инженерного анализа подвижного состава, а также дисциплины, связанные с основами научных исследований. Львом Берковичем подготовлено 4 кандидата технических наук по специальности «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры», он является научным руководителем одного из аспирантов ИрГУПС.

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№ 3 (71)
2 0 2 1

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **А.П. Хоменко**
Ответственный за выпуск **В.Е. Гозбенко**

Подписано в печать 23.09.2021. Формат 60x84/8.
Дата выхода в свет 30.09.2021
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 25.
Уч.-изд. л. 23,75. Тираж 500 экз. Заказ № 3597
Подписной индекс по каталогу «Урал-Пресс»: 64556
ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ РАН.

Сведения о журнале ежегодно
публикуются в международной справочной системе
по периодическим и продолжающимся изданиям
«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01

Маркировка информационной продукции - не маркируется

Цена свободная

Адрес редакции, издательства и типографии
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Иркутский государственный университет путей сообщения
Телефон: 8(3952) 63-83-89, 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)