

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

ISSN 1813-9108 (Print)

# Современные технологии Системный анализ Моделирование

2022

№ 1 (73)

Иркутский государственный  
университет путей сообщения

д.т.н., профессор

ЕЛЕНА АНАТОЛЬЕВНА



РУШ

# Modern technologies System analysis Modeling

2022

No. 1 (73)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye

Современные технологии. Моделирование  
Системный анализ. Моделирование

2022 № 1(73)

Modern technologies. Modeling  
System analysis. Modeling

Подписной индекс  
в каталоге «Урал-Пресс» - 64556

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



**Современные технологии**  
**Системный анализ**  
**Моделирование**

**№ 1 (7 3)**  
**2 0 2 2**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Главный редактор **А.П. Хоменко**  
Ответственный за выпуск **В.В. Гасельник**

# Современные технологии Системный анализ Моделирование

Издаётся с 2004 года

2022  
№ 1 (73)

Выходит 4 раза в год

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

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

## Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Та Зуй Фыонг, 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.irkups.ru/index.php/stsam>

**e-mail:** [stsam@irkups.ru](mailto:stsam@irkups.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

Founded in 2004

ISSN 1813-9108 (Print)

2022

No. 1 (73)

Published quarterly

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye

## 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.V. Gaselnik, Ph.D.Sc. in Engineering, Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

D.V. Butorin, Ph.D.Sc. in Engineering, 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 Chuvas 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.irkups.ru/index.php/stsam>

**e-mail:** stsam@irkups.ru

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

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

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

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

- Mechanical engineering and mechanical science;
- Transport.

## СОДЕРЖАНИЕ

## Машиностроение, машиноведение и энергетические системы

Маломыжев Д. О., Пыхалов А. А. Анализ достоверности решения методом конечных элементов задачи расчета деталей на усталостную прочность при повторно-переменных напряжениях .....	10
Данеев А. В., Данеев Р. А., Сизых В. Н. Математическая модель шестифазного магнитоэлектрического генератора с мостовым выпрямителем и активно-индуктивной нагрузкой на выходе .....	21
Павлов В. Д. Механическая мощность при гармонических воздействиях .....	30
Елисеев А. В., Большаков Р. С. Системные подходы в обобщенной оценке динамических особенностей вибрационных взаимодействий элементов технических объектов транспортного и технологического назначения в условиях связных силовых нагрузений .....	39

## Транспорт

Асалханова Т. Н., Карпов И. Г., Лагерев С. Ю. Роботизация технологии допуска бригад к выполнению путевых работ в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой .....	54
Дубровская Т. А., Тавтын А. В. Реконструкция участка железной дороги с целью увеличения скоростей движения поездов .....	64
Асламова В. С., Кузнецова П. А., Асламов А. А. Анализ показателей травматизма на федеральных автомобильных дорогах Иркутской области и их трендов .....	75
Лебедева О. А., Гозбенко В. Е. Оценка грузового спроса посредством восстановления матриц корреспонденций с использованием различных данных .....	86
Полтавская Ю. О. Решение задачи маршрутизации в транспортной сети с использованием псевдополиномиальной модели .....	95
Буякова Н. В., Крюков А. В., Середкин Д. А., Степанов А. Д. Электромагнитная безопасность на трассах многопутных участков тяговых сетей 25 кВ .....	104
Калякулин А. Н., Анахова М. В., Тычков А. С. Совершенствование системы контроля параметров в процессе сушки изоляции обмоток тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 .....	114
Мухин О. О. Математическая модель прогнозирования среднесуточного пробега локомотивов .....	123
Пузина Е. Ю. Выбор оптимальных видов оборудования уровня процесса и уровня подстанции цифровой тяговой подстанции .....	133
Супрун Д. А., Скорик В. Г. Применение интеграла Дюамеля для анализа электромагнитных процессов в силовых цепях электровозов переменного тока .....	145
Лобанов О. В., Ступицкий В. П., Астраханцев Л. А. Анализ эксплуатационного контроля состояния жестких поперечин контактной сети .....	153

<b>Краковский Ю. М., Беляков В. О., Начигин В. А.</b> Оценка надежности рельсовых скреплений на основе экспертной информации с использованием метода Монте-Карло .....	163
<b>Абдурашитов А. Ю., Юркова Ю. Н.</b> О взаимодействии пути и подвижного состава на участках скоростного движения в зависимости от очертания профилей рельсов и колес .....	170
<b>Бурдяк П. С.</b> Разработка модели подготовки сотрудников сферы транспорта к работе в нестандартных ситуациях .....	178

**Информационные технологии, управление и обработка**

<b>Оленцевич В. А., Власова Н. В.</b> Разработка алгоритма расчета потребности профильного недвижимого имущества объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры с целью оптимизации грузовой работы .....	188
---	-----

**Персоналии**

Д.т.н., профессор Е. А. Руш .....	198
-----------------------------------	-----

## CONTENTS

**Machine Building, Theoretical Engineering and Energy Systems**

**Malomyzhev D. O., Pykhalov A. A.** Solution validity analysis of calculation problems of parts for fatigue strength at repeatable variables stresses by the finite element method ..... 10

**Daneev A. V., Daneev R. A., Sizykh V. N.** Universal mathematical model of the six-phase magnetoelectric generator with bridge rectifier and active-inductive load at the output ..... 21

**Pavlov V. D.** Mechanical power under harmonic influences ..... 30

**Eliseev A. V., Bolshakov R. S.** System approach in a generalized assessment of the vibrational interactions' dynamic features of the elements of transport and technological objects under coherent force loadings ..... 39

**Transport**

**Asalkhanova T. N., Karpov I. G., Lagerev S. Yu.** Robotization of track crews admission technology in a unified corporate automated infrastructure management system ..... 54

**Dubrovskaya T. A., Tavtyn A. V.** Reconstruction of a section of the railway in order to increase the speed of trains ..... 64

**Aslamova V. S., Kuznetsova P. A., Aslamov A. A.** Analysis of federal vehicles injury rates on the roads of the Irkutsk region and their trends ..... 75

**Lebedeva O. A., Gozbenko V. E.** Assessing cargo demand through matrix recovery Correspondence using different data ..... 86

**Poltavskaya Ju. O.** Solution problem of routing in transport network using pseudopolynomial model ..... 95

**Buyakova N. V., Kryukov A. V., Seredkin D. A., Stepanov A. D.** Electromagnetic safety on routes of multiple sections of 25 kV traction networks ..... 104

**Kalyakulin A. N., Anakhova M. V., Tychkov A. S.** Improvement of the parameter control system in the process of drying the insulation of the windings of traction electric motors of electric locomotives 2ES6 ..... 114

**Mukhin O. O.** Mathematical model for the locomotive average daily mileage forecasting ..... 123

**Puzina E. Yu.** Selection of optimal types of the process level and substation level equipment of the digital traction substation ..... 133

**Suprun D. A., Skorik V. G.** Using the Duhamel integral to analyze electromagnetic processes in the power circuits of AC electric locomotives ..... 145

**Lobanov O. V., Stupitskiy V. P., Astrakhantsev L. A.** Analysis of operational control of the contact network rigid crossbars condition ..... 153

<b>Krakovskiy Yu. M., Belyakov V. O., Nachigin V. A.</b> Assessment of the reliability of rail fasteners based on expert information using the Monte Carlo method .....	163
<b>Abdurashitov A. Yu., Yurkova Yu. N.</b> On the interaction of track and rolling stock on high-speed sections depending on the shape of rail and wheel profiles .....	170
<b>Burdyak P. S.</b> Development of a model for training transport workers to function in non-standard situations .....	178

**Information technology, management and processing**

<b>Olentsevich V. A., Vlasova N. V.</b> Development of an algorithm for calculating the needs of railway transport infrastructure facilities for profile real estate in order to optimize cargo work .....	188
--	-----

**Personalities**

Doctor of Technical Sciences, Professor E. A. Rush .....	198
--	-----

**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 NewRoman (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 полутона, 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 В-206. Буторин Денис Витальевич.  
Телефон: 8(3952) 638-399, доб. 0179. E-mail: [stsam@irgups.ru](mailto:stsam@irgups.ru)

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МАШИНОВЕДЕНИЕ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

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

## Анализ достоверности решения методом конечных элементов задачи расчета деталей на усталостную прочность при повторно-переменных напряжениях

Д. О. Маломыжев, А. А. Пыхалов✉

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

✉ pykhalov\_aa@mail.ru

### Резюме

В работе рассматривается анализ деталей подвижного состава железных дорог, подвергаемых воздействию как постоянных, так и переменных по времени, величине и знаку нагрузок, на усталостную прочность. Наиболее актуальным этот анализ является для несущих деталей механической части. В результате представленного воздействия в них появляются дефекты усталостной природы. Таким образом, наряду с анализом на предельную нагрузку деталей подвижного состава железных дорог, в виде напряженно-деформированного состояния и прочности, для изучения параметров их надежности и долговечности, необходимо проводить решение задач усталостной прочности. Наиболее эффективным подходом представленного изучения остается использование натурных испытаний, с доводкой изделия для получения необходимых параметров его долговечности. Главной характеристикой испытаний является получение усталостных характеристик и численных значений предела выносливости. Однако, наряду с высокими временными и материальными затратами, главным недостатком испытаний является низкий уровень информативности в отношении точности определения полей напряжений в реальных деталях изделия. Для выхода на решение этой проблемы в работе рассматривается изучение возможности использования метода конечных элементов, как наиболее перспективного для изучения работы деталей в сборках конструкций несущих узлов подвижного состава железных дорог. Анализ достоверности численного решения метода конечных элементов в виде напряженно-деформированного состояния детали проводится в соответствии с известным аналитическим (полуэмпирическим) решением, представленным в литературе.

### Ключевые слова

напряженно-деформированное состояние, усталостное разрушение, параметры надежности и долговечности, метод конечных элементов

### Для цитирования

Маломыжев Д. О. Анализ достоверности решения методом конечных элементов задачи расчета деталей на усталостную прочность при повторно-переменных напряжениях / Д. О. Маломыжев, А. А. Пыхалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 10–20. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).10-20

### Информация о статье

поступила в редакцию: 10.12.2021 г.; поступила после рецензирования: 01.03.2022 г.; принята к публикации: 11.03.2022 г.

## Solution validity analysis of calculation problems of parts for fatigue strength at repeatable variables stresses by the finite element method

Д. О. Маломыжев, А. А. Пыхалов✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ pykhalov\_aa@mail.ru

### Abstract

During the operation of the rolling stock of railways its parts are exposed to both constant and variable loads in time, magnitude and sign, which applies chiefly to its mechanical part. As a result, inside the parts under conditions of a variable stress-strain state, fatigue defects appear. Thus, along with the usual calculations of variable stress-strain state and the strength of the parts of the operation of the rolling stock of railways, in order to study the parameters of their reliability and durability, it is necessary to solve fatigue strength problems. At present full-scale field tests, followed by a stage of fine-tuning of the product to obtain the necessary parameters of its reliability and durability remain the main approach. This approach is effective because it is characterized by obtaining objective data in the form of a graphical dependence of fatigue characteristics and numerical values of the endurance limit. However, it also has significant disadvantages associated with time and material costs, the most significant one being the low level of informativeness regarding the accuracy of determining stress fields in the parts of the product. To solve this problem, the paper considers the study of the possibility of usage and reliability of computational and theoretical approaches to the analysis of fatigue characteristics of parts using the finite element method, as the most effective from the viewpoint of mathematical modeling of parts geometry, mechanical characteristics of the material and the effective loading. The problem of analyzing the reliability of the numerical solution of the finite element method in the form of a stress-strain state of the part is solved in relation to the well-known analytical (semi-empirical)

solution presented in literature. By means of finite element modeling, the result of the fatigue calculation was obtained in graphical and numerical form, with further comparison of the obtained data with an analytical solution, which will allow to evaluate the validity of the finite element method in problems of fatigue strength of products.

### Keywords

stress-strain state, fatigue failure, reliability and durability parameters, finite element method

### For citation

Malomyzhev D. O., Pykhlov A. A. Analiz dostovernosti resheniya metodom konechnykh elementov zadachi rascheta detalei na ustalostnyu prochnost' pri povtorno-peremennykh napryazheniyah [Solution validity analysis of calculation problems of parts for fatigue strength at repeatable variables stresses by the finite element method]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2022, No. 1 (73), pp. 10–20. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).10-20

### Article Info

Received: 10.12.2021; revised: 1.03.2022; accepted: 11.03.2022.

### Введение

В процессе эксплуатации подвижного состава железных дорог (ПСЖД) его детали подвергаются воздействию как постоянных, так и переменных по времени, величине и знаку нагрузок, в особенности это относится к его механической части. В результате, в условиях переменного напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей, в них появляются дефекты усталостной природы. [1]. При этом, заметные остаточные деформации могут отсутствовать вне зависимости от пластичности материала [1–3]. Таким образом, наряду с обычными расчетами НДС и прочности деталей ПСЖД, для изучения параметров их надежности и долговечности, необходимо решать задачи усталостной прочности [4].

Основным подходом в этом процессе в настоящее время остаются натурные испытания с последующей доводкой изделия до необходимых параметров надежности и долговечности [5, 6]. Этот подход эффективен, так как характеризуется получением объективных численных значений предела выносливости и графических зависимостей в виде усталостных характеристик [7, 8] используемых материалов. Однако он имеет и существенные недостатки, связанные с временными и материальными затратами, а главным из них является низкий уровень информативности в отношении точности определения полей напряжений в деталях изделия.

Таким образом, наряду с натурными испытаниями деталей на усталостную прочность остается востребованным дальнейшее развитие теоретических (математических) расчетных подходов анализа усталости деталей ПСЖД с применением эффективных численных методов и электронно-вычислительных машин (ЭВМ).

Наибольшее применение из численных методов [9–14] анализа НДС деталей, в настоящее время, получил метод конечных элементов (МКЭ), как отвечающий максимальной эффективности с точки зрения математического моделирования геометрии деталей, механических характеристик их материала и действующего внешнего нагружения. Благодаря этому численному решению, многократно сокращается время для определения НДС детали, с графическим отображением этого состояния в любой момент времени действия переменной нагрузки. Полученная таким образом картина НДС отражает, в наиболее точном виде, воздействие конструктивно-силовых факторов при работе детали и может использоваться для получения данных в расчете её усталостной прочности [1, 4, 8].

В работе исследуется достоверность расчетных подходов анализа усталостных характеристик деталей ПСЖД с применением МКЭ, проводимого с использованием известных аналитических решений [1–3, 9, 15], анализируются численные решения МКЭ в виде НДС детали. Результат конечно-элементного моделирования используется для усталостного расчета в графическом и числовом виде. Эти сведения в дальнейшем сравниваются с данными аналитического решения, что позволяет оценить валидность метода конечных элементов в задачах на усталостную прочность изделий.

### Расчетная модель для аналитического и численного решения методом конечных элементов

В качестве объекта исследования используется модель полого вала, имеющего следующие размеры: наружный диаметр  $D = 0,07$  м,

внутренний диаметр  $d = 0,035$  м, длина вала для расчетной модели  $L = 0,1$  м. Все поверхности вала шлифованы, т. е. имеют высокий класс по шероховатости и точности изготовления (рис. 1). Также в конструкции вала, в некотором его сечении, используется (моделируется) отверстие, предназначенное для протекания смазки. Диаметр этого отверстия  $d_s = 0,003$  м.

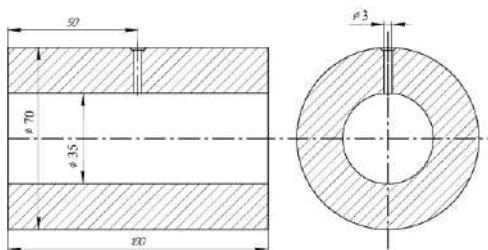


Рис. 1. Полый вал  
Fig. 1. Hollow shaft

Так как при работе вал, в любом его сечении, нагружен одновременно изгибающим и кручущим моментами, то такой вид деформации называется изгиб с кручением. Подобным видам нагружений подвергаются валы машин и механизмов, где имеют место нагрузка от зацепления зубчатых колес или шкива, а также прогиб вала под собственным весом [1, 16].

Исследуемый вал (см. рис. 1) при вращении испытывает нагружение в виде переменного изгиба с максимальным моментом  $M_{из(макс)} = 1471$  Н·м, и переменное кручение с амплитудным моментом  $M_{kp(макс)} = 1765,2$  Н·м, с коэффициентом асимметрии  $r = -0,25$  (рис. 2) [1]. Вид цикла нагружения при кручении в соответствии с коэффициентом асимметрии, представлен на рис 3.

Цикл нагружения при изгибе представляет собой обычную знакопеременную синусоиду, где амплитудные значения  $M_{из(макс)} = -M_{из(мин)}$ .

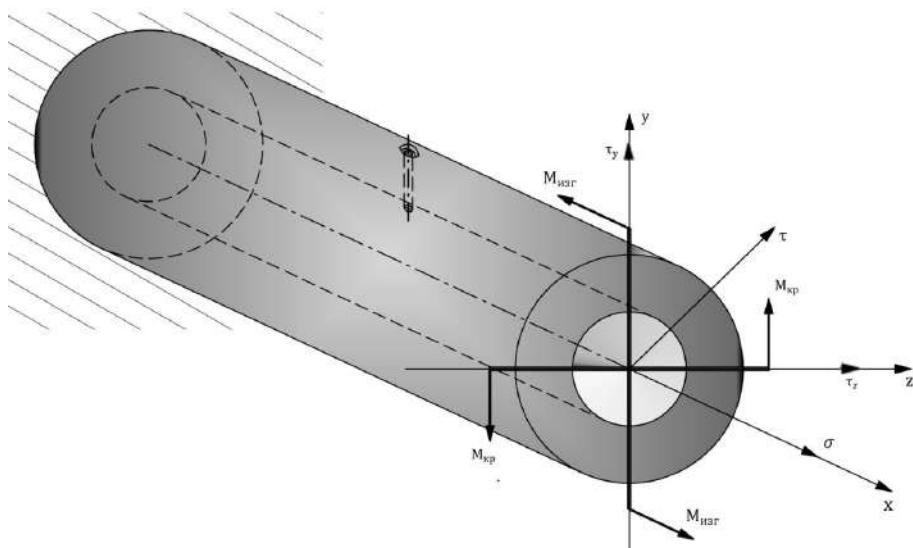


Рис. 2. Вид сложного нагружения вала  
Fig. 2. Type of complex shaft loading

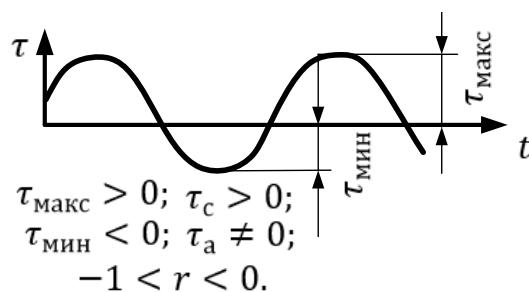


Рис. 3. Вид цикла нагружения вала:  $\tau_a$  – амплитудное значение напряжения от кручения;  $\tau_c$  – среднее значение напряжения от кручения;  $\tau_{макс}$  – максимальное значение напряжения от кручения;  $\tau_{мин}$  – минимальное значение напряжения от кручения

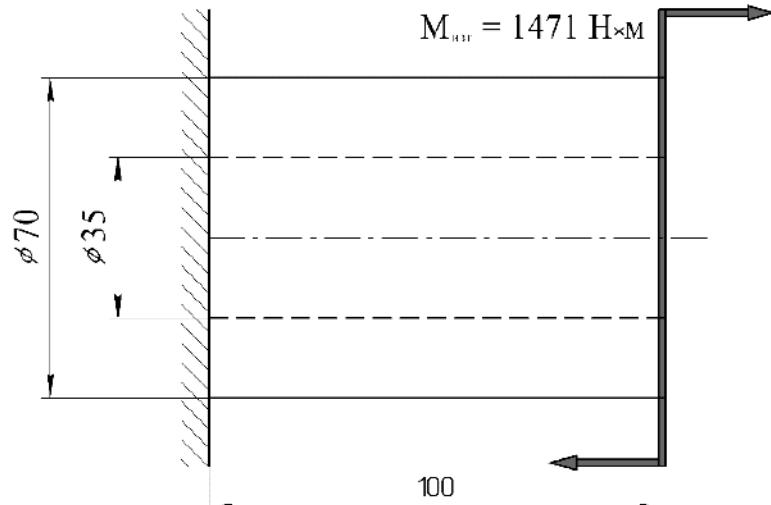
Fig. 3. View of the shaft loading cycle:  $\tau_a$  – amplitude value of a torsion stress;  $\tau_c$  – mean value of a torsion stress;  $\tau_{макс}$  – maximum value of the torsion stress;  $\tau_{мин}$  – minimum value of a torsion stress

Вал изготовлен из стали 45, имеющая механические характеристики, полученные в натурном эксперименте по определению предела выносливости и показателей усталости используемого материала, в виде: предела прочности  $\sigma_b = 686,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ , предела текучести  $\sigma_t = 313,8 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ , предела выносливости при изгибе  $\sigma_{-1} = 294,2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$  и кручении  $\tau_{-1} = 176,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ . Схема нагружения и граничных условий представлены на рис. 4.

В данной задаче необходимо определить запас усталостной прочности вращающегося вала при знакопеременных напряжениях.

Аналитический расчет произведен на основе [1–3]. Максимальное напряжение в валу от изгиба:

a)



б)

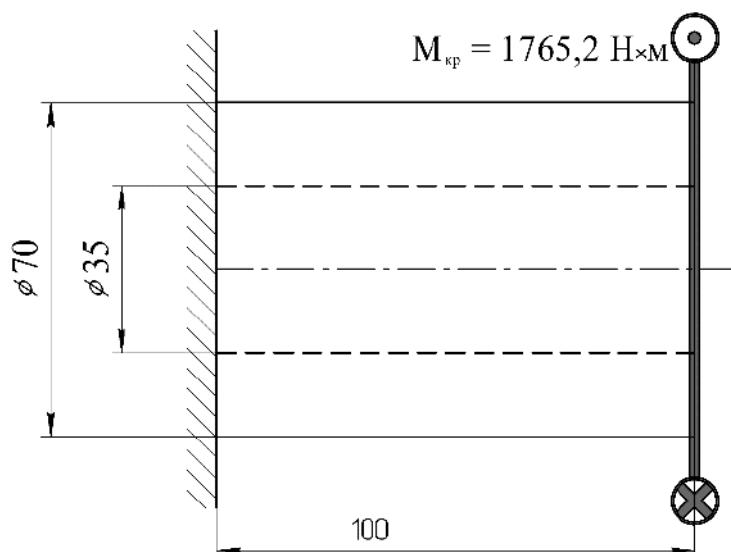


Рис. 4. Схема нагружения и заделки: а) изгибающим моментом; б) крутящим моментом  
Fig. 4. Loading and sealing scheme: a) bending moment; b) torque

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{u3}}{W} = \frac{32 \cdot M_{u3}}{\pi \cdot D^3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right]} =$$

$$= \frac{32 \cdot 1471}{\pi \cdot 0,07^3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0,035}{0,07} \right)^4 \right]} = 46,6 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2. \quad (1)$$

где  $W$  – момент сопротивления поперечного кольцевого сечения вала изгибу.

Амплитудное значение напряжения равно максимальному:

$$\sigma_a = \sigma_{\max} = 46,6 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2.$$

При таком виде нагружения  $\sigma_{cp} = 0$ .

Максимальное напряжение в валу от кручения определяется по формуле:

$$\tau_{\max} = \frac{M_{kp(\max)}}{W_p} = \frac{16 \cdot M_{kp(\max)}}{\pi \cdot D^3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right]} =$$

$$= \frac{16 \cdot 1765,2}{\pi \cdot 0,07^3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0,035}{0,07} \right)^4 \right]} = 27,9 \cdot 10^6 \text{ H/m}^2.$$

Из-за наличия несимметричного цикла от кручения (см. рис.3) минимальное значение напряжения будет отличаться от максимального значения в зависимости от коэффициента асимметрии, следовательно:

$$\tau_{\min} = \tau_{\max} \cdot r = 27,9 \cdot 10^6 \cdot (-0,25) = -6,975 \cdot 10^6 \text{ H/m}^2.$$

Амплитудное значение напряжения от кручения определяется по формуле:

$$\tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{27,9 \cdot 10^6 + 6,975 \cdot 10^6}{2} = 17,438 \cdot 10^6 \text{ H/m}^2.$$

Среднее значение напряжения от кручения определяется по формуле:

$$\tau_{\bar{a}} = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{27,9 \cdot 10^6 - 6,975 \cdot 10^6}{2} = 10,463 \cdot 10^6 \text{ H/m}^2.$$

Так как вал круглого сечения, и в нем присутствует поперечное отверстие смазки (см. рис. 1), необходимо определить коэффициенты концентрации при изгибе  $\alpha_{\sigma}$ . Данный коэффициент, по справочным данным, имеет зависимость [1]:

$$\lambda_{\sigma} = f\left(\frac{d_s}{D}\right), \quad (2)$$

$$\text{где } \frac{d_s}{D} = \frac{0,003}{0,07} = 0,04.$$

Из соотношения диаметров (6) определяется коэффициент концентрации  $\alpha_{\sigma}$ . Для нагружения в виде изгиба он равен:  $\alpha_{\sigma} = 2,5$ .

Далее необходимо определить коэффициент чувствительности к концентрации напряжений –  $q_{\sigma}$ , для нагружения в виде изгиба он равен 0,65.

Расчет эффективного коэффициента концентрации при изгибе производится по формуле (1):

$$k_{\sigma} = 1 + q_{\sigma} \cdot (\alpha_{\sigma} - 1) = 1 + 0,65 \cdot (2,5 - 1) = 1,975.$$

Коэффициент, связанный с абсолютными размерами, в рассматриваемой задаче соответствует углеродистой стали, т. е. с наличием умеренной концентрации напряжений, масштабный коэффициент принимается  $\varepsilon_{\sigma}$  составляет 0,7.

Коэффициент, связанный с состоянием поверхности детали принимается равным:  $\beta = 0,92$ .

Эффективный коэффициент концентрации для вала определяется по формуле:

$$(k_{\sigma})_d = \frac{k_{\sigma}}{\varepsilon_{\sigma} \cdot \beta} = \frac{1,975}{0,7 \cdot 0,92} = 3,1.$$

Таким образом, запас прочности на изгиб определяется по формуле:

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{(k_{\sigma})_d \cdot \sigma_a + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_c} = \frac{294,2 \cdot 10^6}{3,1 \cdot 46,6 \cdot 10^6} = 2,05. \quad (3)$$

где  $\psi_{\sigma} = 0,1$  – коэффициент деформаций при изгибе, зависящий от предела прочности материала.

Далее определяются коэффициенты концентрации при кручении [1]. Теоретический коэффициент концентрации принимается  $\alpha_{\tau} = 3$ ; коэффициент чувствительности к концентрации напряжений будет аналогичным этому коэффициенту при изгибе:  $q_{\tau} = q_{\sigma} = 0,65$ . В результате эффективный коэффициент концентрации при кручении определяется по формуле:

$$k_{\tau} = 1 + q_{\sigma} \cdot (\alpha_{\tau} - 1) = 1 + 0,65 \cdot (3 - 1) = 2,3.$$

Коэффициент, связанный с состоянием поверхности детали и масштабный коэффициент при кручении, также связаны с материалом и принимаются аналогичными коэффициентами при изгибе:  $\beta = 0,92$ ;  $\varepsilon_{\tau} = 0,7$ .

На основании принятых значений коэффициентов эффективный коэффициент концентрации вала при кручении рассчитывается по формуле:

$$(k_{\tau})_d = \frac{k_{\tau}}{\varepsilon_{\tau} \cdot \beta} = \frac{2,3}{0,7 \cdot 0,92} = 3,6.$$

Таким образом, запас прочности при кручении вычисляется по формуле:

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{(k_{\tau})_d \cdot \tau_a + \psi_{\tau} \cdot \sigma_c} =$$

$$= \frac{176,5 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 17,438 \cdot 10^6 + 0,05 \cdot 10,463 \cdot 10^6} = 2,77, \quad (4)$$

где  $\psi_{\tau} = 0,05$  – коэффициент деформаций при кручении, зависящий от предела прочности материала.

Общий запас прочности при одновременном действии переменного изгиба и кручения определяется по формуле:

$$n = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} = \frac{2,05 \cdot 2,77}{\sqrt{2,05^2 + 2,77^2}} = 1,65. \quad (5)$$

В результате вычисление коэффициентов запаса прочности по справочным данным [1] показало, что общий запас прочности имеет меньшую величину, чем отдельно при кручении и изгибе.

### Применение метода конечных элементов

Начинается с построения конечного-элементной (КЭ) модели, с последующим её использованием в анализе НДС в детали. Пред-

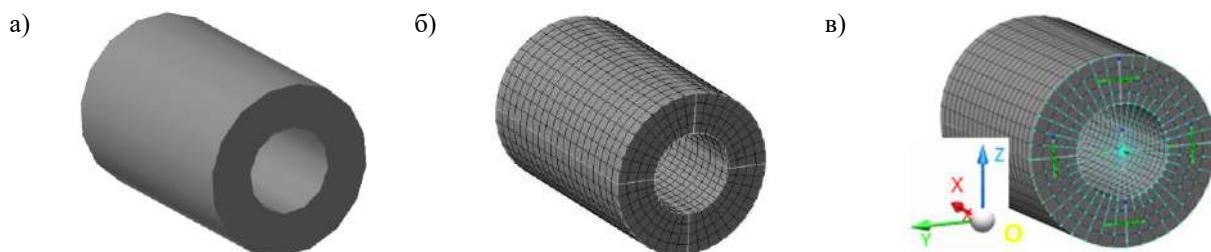
ставленные процедуры проводятся в программном комплексе MSC Apex [17, 18].

Далее представлены 3D-модель и дискретная модель вала без концентратора напряжений (рис. 5, а, б), а также граничные условия консольного закрепления торцевой плоскости вала (рис. 5, в). Все узлы этой плоскости защемлены в направлении оси X; узлы плоскости защемления в плоскости симметрии XOZ защемлены только в направлении оси Y; узлы плоско-

сти защемления сечения в плоскости симметрии XOY защемлены в направлении оси Z.

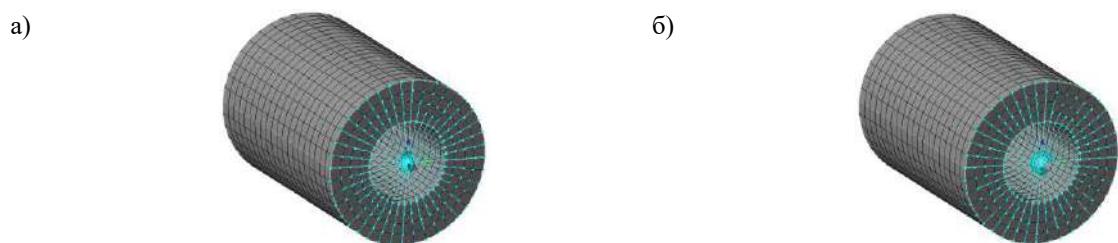
На другом торце КЭ модели вала (рис.6) представлено его нагружение в виде: – изгибающего момента (рис.6а)); и крутящего момента (рис. 6 б)).

Результат расчёта вала на изгиб, при воздействии  $M_{из}$ , представлен на рис. 7. Максимальное значение напряжения при изгибе  $50,2 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>.



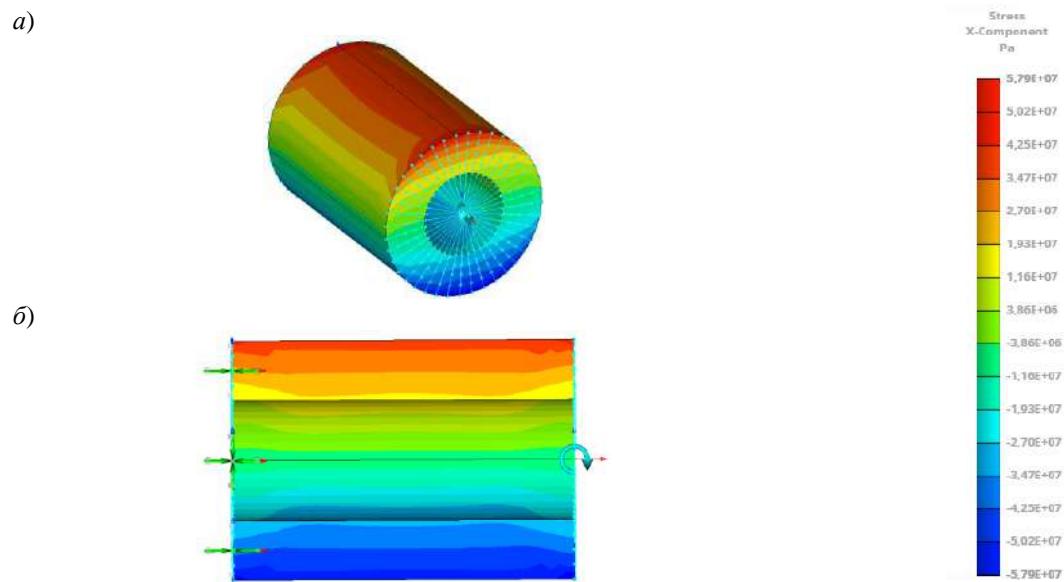
**Рис. 5.** 3D-модель вала без концентратора напряжений: а) 3D-модель; б) дискретная модель; в) условие закрепления

**Fig. 5.** 3D model of the shaft without a stress concentrator: a) 3D model; b) discrete model; c) the condition of fixing.



**Рис. 6.** Нагружение вала: а) изгибающий момент; б) крутящий момент.

**Fig. 6.** Shaft loading: a) bending moment; b) torque.



**Рис. 7.** Результат расчета вала при изгибе: а) вид в изометрии; б) вид в сечении.

**Fig. 7.** The result of the calculation of the shaft under bending: a) the isometric view; b) the sectional view

Результат расчёта вала на кручение для определения максимального значения напряжения равен  $28,3 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$  (рис. 8, в).

Для определения минимального значения напряжения при кручении учитывается коэффициент асимметрии:

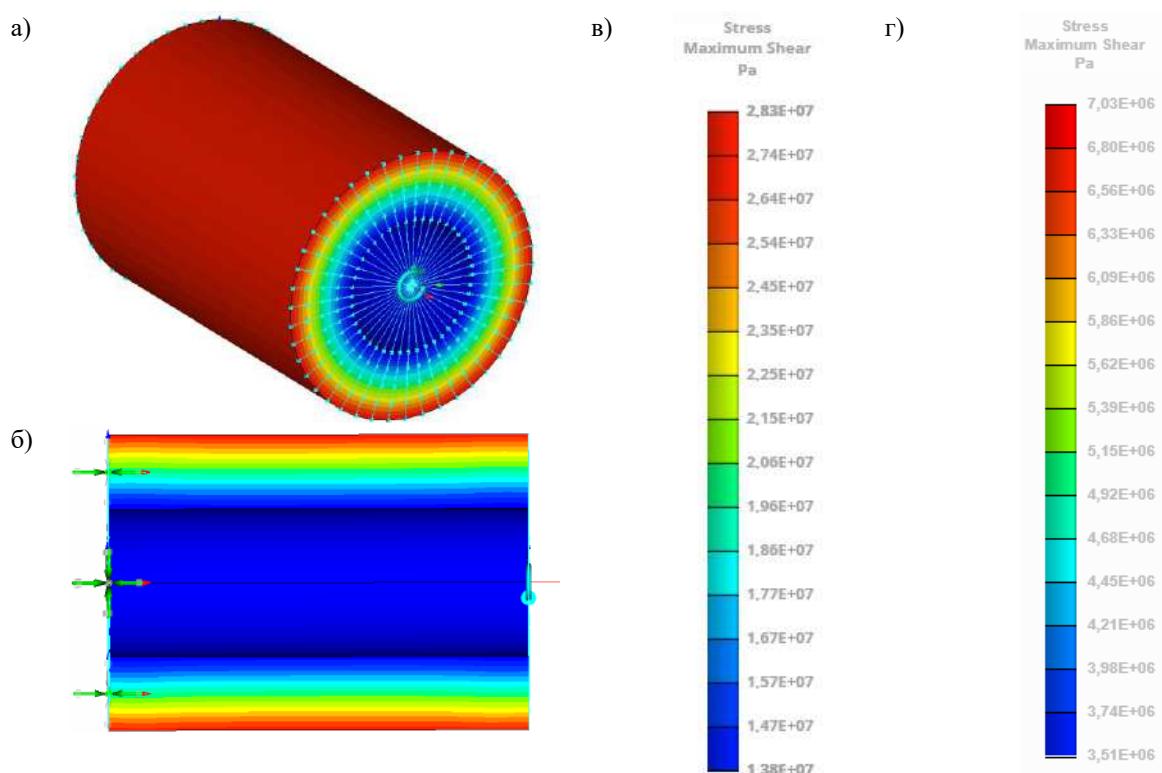
$$M_{kp(\min)} = M_{kp(\max)} \cdot r = 1765,2 \cdot (-0,25) = -441 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Минимальное значение напряжения  $7,03 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$  (рис. 8, г) Значение напряжения отрицательное, так как момент направлен в противоположную сторону.

Для подтверждения валидности МКЭ необходимо сравнить полученные результаты КЭ-моделирования с результатами аналитического решения. Для получения погрешности результатов применим формулу:

$$\Delta = \frac{|x_1 - x_2|}{x_1} \cdot 100\%,$$

где  $x_1$  – результат аналитического решения;  
 $x_2$  – результат МКЭ моделирования.



**Рис. 8.** Результат расчета вала при кручении, определение максимального и минимального значений касательного напряжения: а) вид в изометрии; б) вид в сечении; в) шкала максимальных значений напряжения; г) шкала минимальных значений напряжения.

**Fig. 8.** The calculation result of the shaft during torsion, determination of the maximum and minimum values of the shear stress: a) the isometric view; b) the sectional view; c) maximum stress value scale; d) minimum stress value scale

Определение погрешности результатов вычисления напряжений:

– при изгибе:

$$\Delta = \frac{|46,6 \cdot 10^6 - 50,2 \cdot 10^6|}{46,6 \cdot 10^6} \cdot 100\% = 7,72\%;$$

– при кручении для максимального значения:

$$\Delta = \frac{|27,9 \cdot 10^6 - 28,3 \cdot 10^6|}{27,9 \cdot 10^6} \cdot 100\% = 1,43\%;$$

– при кручении для минимального значения:

$$\Delta = \frac{|6,975 \cdot 10^6 - 7,03 \cdot 10^6|}{6,975 \cdot 10^6} \cdot 100\% = 0,008\%$$

Большее значение погрешности напряжений при изгибе объясняется линейным законом изменения нормальных напряжений аналитического решения при используемой толщине стенки вала.

Определение запаса прочности КЭ решения при кручении, изгибе и общего запаса прочности, производится по формулам (3)–(5) ранее

представленным в аналитическом решении:

– на изгиб:

$$n_{\sigma} = \frac{294,2 \cdot 10^6}{3,1 \cdot 50,2 \cdot 10^6} = 1,89;$$

– при кручении:

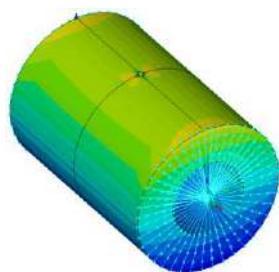
$$n_{\tau} = \frac{176,5 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 17,665 \cdot 10^6 + 0,05 \cdot 10,635 \cdot 10^6} = 2,75;$$

– общего запаса прочности при одновременном действии переменного изгиба и кручения:

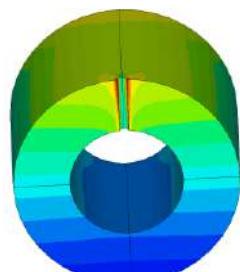
$$n = \frac{1,89 \cdot 2,75}{\sqrt{1,89^2 + 2,75^2}} = 1,55.$$

Определение погрешности в расчете запаса прочности на изгиб, кручение и общего запаса прочности, при сравнении аналитического и КЭ решений имеет вид:

а)



б)



– при изгибе:

$$\Delta = \frac{|2,05 - 1,89|}{2,05} \cdot 100\% = 7,78\%;$$

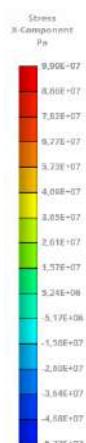
– при кручении:

$$\Delta = \frac{|2,77 - 2,75|}{2,77} \cdot 100\% = 1,94\%;$$

– для общего запаса прочности при изгибе и кручении:

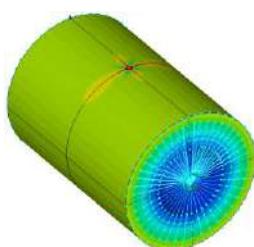
$$\Delta = \frac{|1,65 - 1,55|}{1,65} \cdot 100\% = 6,45\%.$$

Погрешность для напряженно-деформированного состояния, а также запаса прочности составила менее 10%, что позволяет говорить о валидности МКЭ для анализа усталостной прочности деталей ПСЖД.

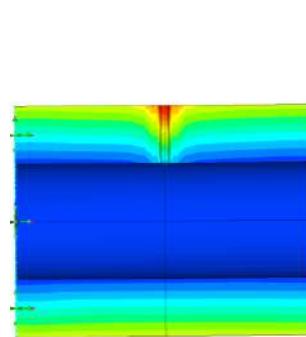
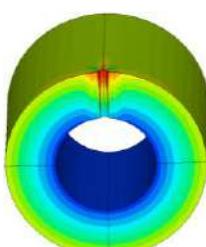


**Рис. 9.** Результат расчета вала при изгибе: а) вид в изометрии; б) вид в сечении.  
**Fig. 9.** The result of the calculation of the shaft in bending: a) the isometric view; b) the sectional view

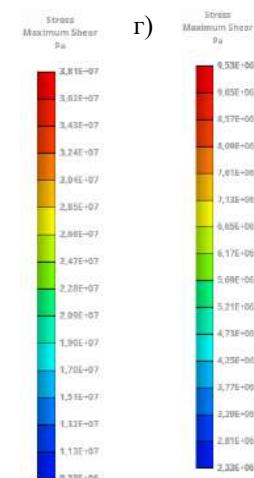
а)



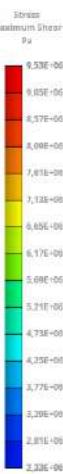
б)



в)



г)



**Рис. 10.** Результат расчета вала при кручении, определение максимального и минимального значения напряжения: а) – вид в изометрии; б) – вид в сечении; в) – шкала максимальных значений напряжения; г) – шкала минимальных значений напряжения.

**Fig. 10.** The result of the calculation of the shaft during torsion, determination of the maximum and minimum values of the shear stress: a) the isometric view; b) the sectional view; c) maximum stress value scale; d) minimum stress value scale

Дальнейшим шагом является создание (КЭ) модели вала с концентратором напряжений в виде отверстия подачи масла и анализ результатов МКЭ. Операции по защемлению перемещений и заданию нагрузки аналогичны выполненным выше.

Результат расчёта вала на изгиб, для определения максимального и минимального значения напряжений, при воздействии  $M_{из}$ , представлен на рис. 9. Максимальное значение напряжения при изгибе составило  $99 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ , оно равно минимальному  $-99 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ .

Результат расчета вала на кручение для определения максимального значения напряжения (от воздействия  $M_{kp(макс)}$ ) и минимального значения напряжения (от воздействия  $M_{kp(мин)}$ ) представлены на рис. 10. Максимальное значение напряжения при кручении составило  $38,1 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$  (рис. 10, в), а минимальное значение  $-9,53 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$  (рис. 10, г).

При расчете запаса прочности на основе МКЭ не будут учитываться поправочные коэффициенты, используемые из литературы [1], так как в концентраторе в виде отверстия для смазки величины напряжений определены.

Определение запаса прочности для

– на изгиб:

$$n_{\sigma} = \frac{294,2 \cdot 10^6}{99 \cdot 10^6} = 2,97;$$

– при кручении:

$$n_{\tau} = \frac{176,5 \cdot 10^6}{23,815 \cdot 10^6 + 14,285 \cdot 10^6} = 4,63;$$

– общего запаса прочности при одновременном действии изгиба и кручения:

$$n = \frac{2,97 \cdot 4,63}{\sqrt{2,97^2 + 4,63^2}} = 2,5.$$

Сравнение результатов аналитического и МКЭ решения проводится определением погрешности в расчете запаса прочности на изгиб и кручение, также общего запаса прочности:

– при изгибе:

$$\Delta = \frac{|2,05 - 2,97|}{2,05} \cdot 100\% = 44,9\%;$$

– при кручении:

$$\Delta = \frac{|2,77 - 4,63|}{2,77} \cdot 100\% = 67,15\%;$$

– общего запаса прочности при изгибе и кручении:

$$\Delta = \frac{|1,65 - 2,5|}{1,65} \cdot 100\% = 51,52\%.$$

### Заключение

Выполненный расчет усталостной прочности полого вала без концентратора в виде максимального и минимального напряжения при изгибе и кручении с применением МКЭ подтвердил его высокий уровень точности (достоверности). Усталостная прочность определяется в пределах 10 % относительно результатов расчета на основе аналитических методов. Полученное расхождение объясняется главным образом линейным распределением нормальных напряжений по толщине стенки вала при теоретическом (сопротивления материалов) расчете изгибающего воздействия. Дополнительно в этой ситуации МКЭ позволяет получить визуальное представление о распределении напряжений по всему объему рассчитываемой детали.

Расчёт усталостной прочности полого вала с концентратором напряжений в виде отверстия, предназначенного для протекания смазки (см. рис.1), с получением полей максимального и минимального напряжения при изгибе и кручении, показал, что результаты вычисления значений запаса прочности с применением МКЭ имеют достаточно высокую степень отличия от результатов, полученных аналитическим методом.

Различие обусловлено тем, что, для упругих моделей деформируемого тела, решение МКЭ, в отличие от аналитического подхода, позволяет получить практически точную картину ИДС в концентраторе напряжений. Это полностью исключает необходимость применения эмпирических поправочных коэффициентов. Неточность (некорректность) этих коэффициентов объясняется широким диапазоном их изменений при сложном нагружении, (например, изгиб с кручением вала). Также значительное влияние на них оказывают размеры и геометрическая форма концентраторов напряжений, профили переходных поверхностей и другие параметры.

### Список литературы

1. Сопротивление материалов / Г.С. Писаренко, В.А. Агарев, А.Л. Квитка и др. Киев : Выш. шк., 1982. 325 с.
2. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М. : Наука, 1976. 608 с.
3. Межецкий Г.Д., Загребин Г.Г., Решетник Н.Н. Сопротивление материалов. М. : Дашков и К, 2016. 432 с.

4. Ужик Г.В. Методы испытаний металлов и деталей машин на выносливость. М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1948. 263 с.
5. Стенд для испытания материалов на усталостную прочность / В.Н. Железняк, Л.Б. Цвик, О.Л. Маломыжев. и др. // Молодая наука Сибири : электрон. науч. журн. 2020. №4(10). URL: <http://mnv.irkups.ru/toma/410-20> (дата обращения 14.11.2021).
6. Оганьян Э.С., Волохов Г.М. Расчеты и испытания на прочность несущих конструкций локомотивов. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2013. 326 с.
7. Расчеты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев и др. М. : Машгиз, 1959. 1078 с.
8. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М. : Машиностроение, 1975. 488 с.
9. Пыхалов А.А. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2006. 428 с.
10. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М. : Мир, 1979. 392 с.
11. Шимановский А.О., Путято А.В. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики. Гомель : БелГУТ, 2008. 61 с.
12. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 539 с.
13. Стрэнг Г. Теория метода конечных элементов. М. : Мир, 1977. 347 с.
14. Чернявский А.О. Метод конечных элементов. Основы практического применения. М. : Машиностроение, 2003. 24 с.
15. Цвик Л.Б., О.Л. Маломыжев. Применение прикладных программ для инженерного анализа состояния деталей подвижного состава. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2020. 136 с.
16. Иткович Г.М., Минин Л.С., Винокуров А.И. Руководство к решению задач по сопротивлению материалов. М. : Вышш. шк., 1999. 592 с.
17. Компьютерные технологии инженерного анализа в проектировании рамы тележки электровоза / Е.Ю. Дульский, Е.А. Милованова, А.А. Пыхалов и др. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. 68 с.
18. MSC Apex (MSC Software) // Hexagon : site. URL: <https://www.mscsoftware.com/product/msc-apex-modeler> (дата обращения 18.09.2021).

### References

1. Pisarenko G.S., Agarev V.A., Kvitka A.L., Popkov V.G., Umanskii E.S. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]. Kiev: Vysshaya Shkola Publ., 1982. 325 p.
2. Belyaev N.M. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]. Moscow: Nauka Publ., 1976. 608 p.
3. Mezhetskii G.D., Zagrebin G.G., Reshetnik N.N. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]. Moscow: Dashkov i K Publ., 2016. 432 p.
4. Uzhik G.V. Metody ispytaniy metallov i detaley mashin na vynoslivost' [Methods of testing metals and machine parts for endurance]. Moscow: Akademiya nauk SSSR Publ., 1948. 263 p.
5. Zheleznyak V.N., Tsvik L.B., Malomyzhev O.L., Martynenko L.V. Stend dlya ispytaniya materialov na ustalostnuyu prochnost' [Elektronnyi resurs] [Stand for testing materials for fatigue strength (Electronic resource)]. Molodaya nauka Sibiri [Young science of Siberia]. 2020. no. 4. URL: Rezhim dostupa: <http://mnv.irkups.ru/toma/410-20>.
6. Ogan'yan E.S., Volokhov G.M. Raschety i ispytaniya na prochnost' nesushchih konstrukcij lokomotivov [Calculations and strength tests of load-bearing structures of locomotives]. Moscow: FGBOU «Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2013. 326 p.
7. Ponomarev S.D., Biderman V.L., Likharev K.K., Makushin V.M., Feodos'ev V.I. Raschety na prochnost' v mashinostroenii [Strength calculations in mechanical engineering]. Moscow: Mashgiz Publ., 1959. 1078 p.
8. Serensen S.V., Kogaev V.P., R.M. Shneiderovich. Nesushchaya sposobnost' i raschety detaej mashin na prochnost' [Bearing capacity and strength calculations of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975. 488 p.
9. Pykhalov A.A. Kontaktnaya zadacha staticheskogo i dinamicheskogo analiza sbornyh rotorov turbomashin [Contact problem of static and dynamic analysis of assembled turbomachine rotors]. Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2006, 428 p.
10. Segerlind L. Primenenie metoda konechnykh elementov [Application of the finite element method]. Moscow: Mir Publ., 1979. 392 p.
11. Shimanovskii A.O., Putyato A.V. Primenenie metoda konechnykh elementov v reshenii zadach prikladnoj mehaniki [Application of the finite element method in solving problems of applied mechanics]. Gomel': BelGUT Publ., 2008. 61 p.
12. Zenkevich O.C. Metod konechnykh elementov v tekhnike [The finite element method in engineering]. Moscow: Mir Publ., 1975. 539 p.
13. Streng G. Teoriya metoda konechnykh elementov [Theory of the finite element method]. Moscow: Mir Publ., 1977. 347 p.
14. Chernyavskii A.O. Metod konechnykh elementov. Osnovy prakticheskogo primeneniya [The finite element method. Fundamentals of practical application]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2003. 24 p.
15. Tsvik L.B., Malomyzhev O.L. Primenenie prikladnykh programm dlya inzhenernogo analiza sostoyaniya detailei podvizhnogo sostava [Application of application programs for engineering analysis of the condition of rolling stock parts]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2020. 136 p.
16. Itskovich G.M., Minin L.S., Vinokurov A.I. Rukovodstvo k resheniyu zadach po soprotivleniyu materialov [A guide to solving problems on the resistance of materials]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1999. 592 p.

17. Dul'skii E.Yu., Milovanova E.A., Pykhalov A.A., Ivanov P.Yu., Senchenko P.Yu. Komp'yuternye tekhnologii inzheernogo analiza v proektirovaniï ramy telezhki elektrovoza [Computer technologies of engineering analysis in the design of the electric locomotive trolley frame]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. 68 p.

18. MSC Apex (MSC Software) (Elektronnyi resurs) [MSC Apex (MSC Software) (Electronic resource)]. URL: <https://www.mscsoftware.com/product/msc-apex-modeler> (Accessed September 18, 2021).

### Информация об авторах

**Маломыжев Дмитрий Олегович**, аспирант кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kbprf13@gmail.com

**Пыхалов Анатолий Александрович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pykhalov\_aa@mail.ru

### Information about the authors

**Dmitrii O. Malomyzhev**, Ph. D. Student of Department «Physics, Mechanics and Instrumentation», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kbprf13@gmail.com

**Anatolii A. Pykhalov**, Doctor of Engineering Science, Professor, the Full Professor of Department «Physics, Mechanics and Instrumentation», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: pykhalov\_aa@mail.ru

## Математическая модель шестифазного магнитоэлектрического генератора с мостовым выпрямителем и активно-индуктивной нагрузкой на выходе

А. В. Данеев<sup>1</sup>✉, Р. А. Данеев<sup>2</sup>, В. Н. Сизых<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российской Федерации

<sup>2</sup>Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск, Российской Федерации

✉ daneev@mail.ru

### Резюме

В авиационно-космической технике, а также в процессе реализации идеи перехода на постоянный ток повышенного напряжения 270 В (концепция построения самолета с полностью электрифицированным оборудованием) остро всталася проблема разработки источников электрической энергии с большой мощностью. Эта проблема имеет решение на основе синхронных генераторов с возбуждением высококоэрцитивных постоянных магнитов, работающих на выпрямительную нагрузку. Такие генераторы получили название магнитоэлектрических. В статье исследуется методика разработки алгоритмического обеспечения магнитоэлектрического генератора с мостовым выпрямителем, который работает на активно-индуктивную нагрузку. При этом возникают вопросы, связанные с выбором рациональных форм представления моделей и рекомендациями по их практическому применению для исследования различных режимов работы такого генератора. Анализ процессов в магнитоэлектрическом генераторе может быть выполнен по математическим моделям с различными моделями вентиля. Исходные данные, параметры генератора и принимаемые при моделировании допущения те же, что и при исследовании работы магнитоэлектрического генератора на шестифазную нулевую схему выпрямления. Предлагаемый подход к математическому описанию вентильного генератора позволяет изучить электромагнитные процессы в магнитоэлектрическом генераторе с многофазным мостовым выпрямителем во всем диапазоне изменения нагрузок: от режима холостого хода до режима внешнего короткого замыкания генератора. Математическая модель шестифазного рассматриваемого вентильного генератора построена на основе матрично-топологического метода анализа электрических цепей в однородном базисе переменных.

### Ключевые слова

математическая модель, шестифазный магнитоэлектрический генератор, мостовой выпрямитель, активно-индуктивная нагрузка

### Для цитирования

Данеев А. В. Математическая модель шестифазного магнитоэлектрического генератора с мостовым выпрямителем и активно-индуктивной нагрузкой на выходе / А. В. Данеев, Р. А. Данеев, В. Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 21–29. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).21-29

### Информация о статье

поступила в редакцию: 19.01.2022 г.; поступила после рецензирования: 26.03.2022 г.; принята к публикации: 28.03.2022 г.

## Universal mathematical model of the six-phase magnetoelectric generator with bridge rectifier and active-inductive load at the output

А. В. Данеев<sup>1</sup>✉, Р. А. Данеев<sup>2</sup>, В. Н. Сизых<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Irkutsk, the Russian Federation

✉ daneev@mail.ru

### Abstract

In aerospace engineering and in the implementation of the idea of switching to direct current of increased voltage of 270 V (the concept of building an aircraft with fully electrified equipment), the problem of developing sources of high power electrical energy has become urgent. This problem has a solution based on synchronous generators with excitation of high-coercive permanent magnets, operating for a rectifying load. Such generators are called magnetoelectric generators. The paper investigates a methodology for the development of algorithmic support for magnetoelectric generators with a bridge rectifier, operating for an active-inductive load. Herefrom questions arise related to the choice of rational forms of representation of models and recommendations for their practical application in the study of various modes of magnetoelectric generators operation. The analysis of processes in magnetoelectric generator can be carried out using mathematical models with different valve designs. The initial data, the generator parameters and the assumptions made in the modeling are the same as in the study of the magnetoelectric generator operation for a six-phase zero rectification circuit. The proposed approach to the mathematical description of the valve

generator makes it possible to study electromagnetic processes in a magnetoelectric generator with a multiphase bridge rectifier in the entire range of load changes: from no-load idling mode to external short-circuit of the generator. The mathematical model of the considered six-phase valve generator is built on the basis of a matrix-topological method for analyzing electrical circuits in a homogeneous basis of variables.

### Keywords

mathematical model, six-phase magnetoelectric generator, bridge rectifier, active-inductive load

### For citation

Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N. Matematicheskaya model' shestifaznogo magnitoelektricheskogo generatora s mostovym vypryamitelem i aktivno-induktivnoy nagruzkoj na vkhode [Mathematical model of a six-phase magnetoelectric generator with a bridge rectifier and an active-inductive load at the output]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 21–29. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).21-29

### Article Info

Received: 19.01.2022, Revised: 26.03.2021, Accepted: 28.03.2021

### Введение

Рассмотрим шестифазный магнитоэлектрический генератор (МЭГ) с мостовым выпрямителем. Нагрузка этого вентильного генератора (ВГ) – активно-индуктивная. Исходные данные, параметры генератора и принимаемые

допущения аналогичны исследованию работы МЭГ на шестифазную нулевую схему выпрямления [1].

Схема замещения исследуемого ВГ представлена на рис. 1.

В отличие от схемы замещения шести-

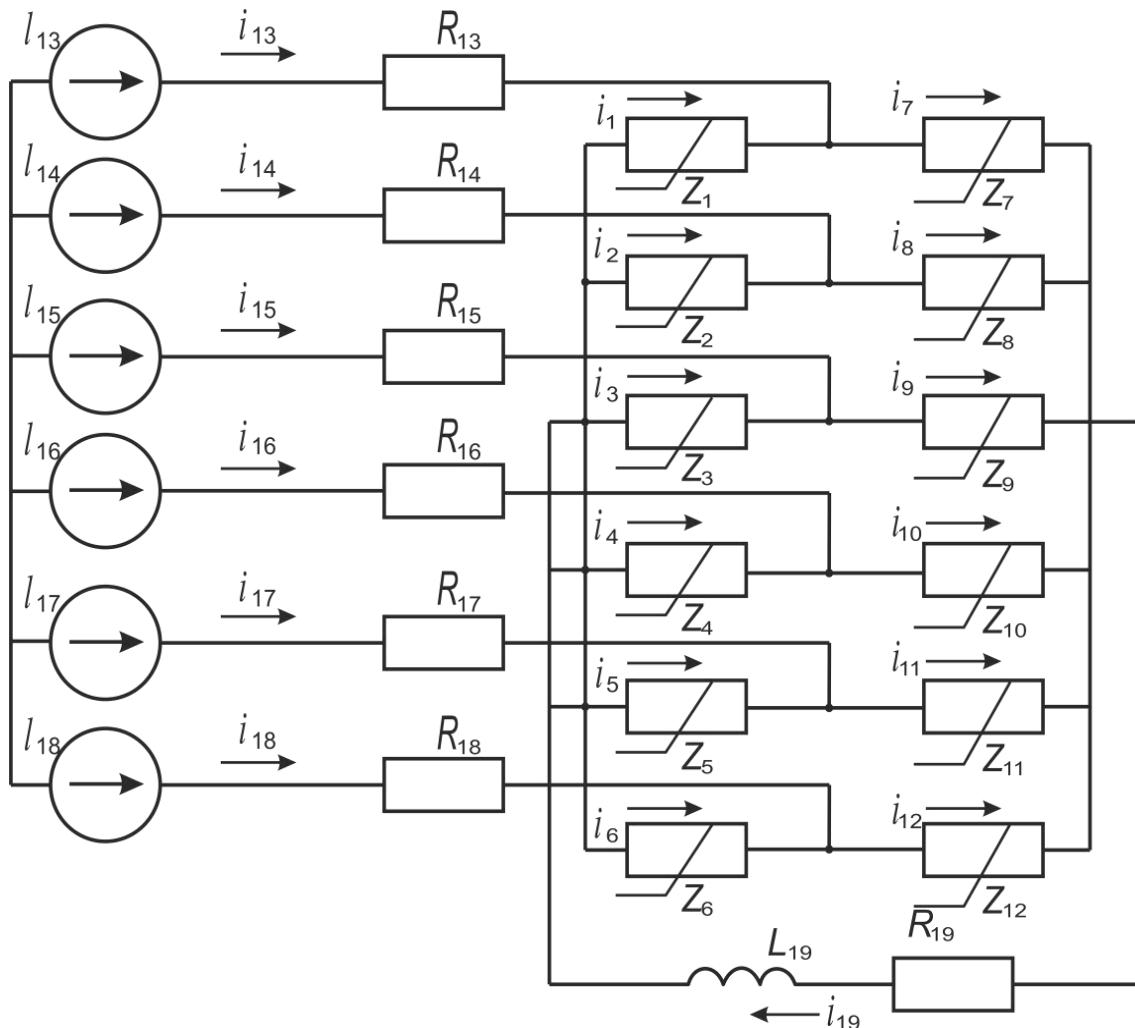


Рис. 1. Схема замещения вентильного магнитоэлектрического генератора  
Fig.1. Scheme of substitution of valve magnetoelectric generator

фазного мостового выпрямителя [2], где в моделирующей программе вектор ЭДС, наводимых постоянным магнитом (ПМ), формируется как последовательность синусоид со сдвигом в 60 эл., в данной схеме под вектором обобщенных ЭДС  $e = (e_{13}e_{14} \dots e_{18})^T$  понимается вектор ЭДС  $e = (e_{a1}e_{b1}e_{c1}e_{a2}e_{b2}e_{c2})^T$  двух трехфазных «обмоток» МЭГ  $a_j - b_j - c_j$  ( $j = 1, 2$ ) со сдвигом фаз в каждой обмотке 120 эл. Обмотки сдвинуты между собой на 60 эл. (рис. 2).

Такое представление ЭДС удобно при формировании симметрической матрицы индуктивностей и взаимных индуктивностей  $L(t)$  обмоток МЭГ [3].

### Постановка задачи

Вид направленного связного графа (с числом ветвей  $p = 19$ , вершин  $q = 9$  и независимых контуров  $m = 11$ ) и его дерева по принимаемой нумерации ветвей схемы замещения ВГ и их приоритетной принадлежности к ребрам или хордам соответствует рис. 2 в работе А.Н. Дедовского «Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами» [2]. Контурная матрица при этом представляется как  $B = [E:K]$ . В схеме замещения ВГ отсутствуют емкостные элементы, для математического описания модели воспользуемся представлением переменных состояния в однородном базисе. Процессы в электрической цепи произвольной конфигурации описаны матричным уравнением [1] следующего вида:

$$e_x + k e_p = (z_x + k z_p k^T) \cdot i_x. \quad (1)$$

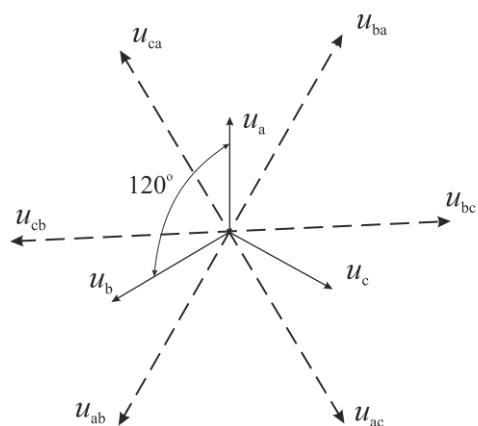


Рис. 2. Векторные диаграммы электродвижущей силы фаз генератора  
Fig. 2. Vector diagrams of electromotive force of generator phases

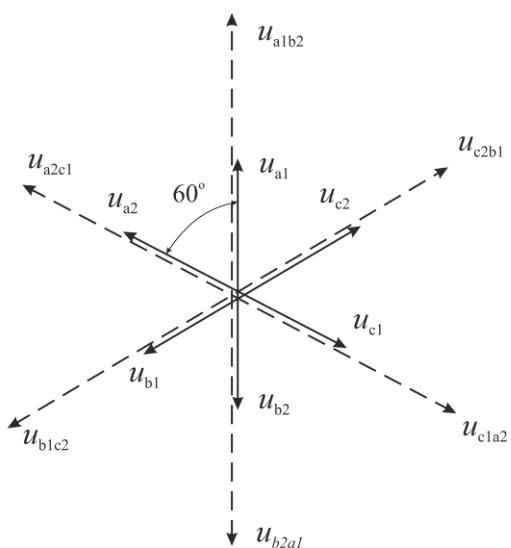
Фундаментальную матрицу контуров  $K$  разобьем (как показано жирными линиями) на следующие субматрицы:

$$K = [K_1: K_2: K_3],$$

где  $K_1$  – субматрица размерности  $11 \times 1$ , определяющая по столбцу ветвь вентиля 12 ( $V_p$  – ребро графа, соответствующее ветви с вентилем 12);  $K_2$  – субматрица размерности  $11 \times 6$ , характеризующая по столбцу ветви с источником обобщенных ЭДС ( $\Gamma_p$  – ребра графа, соответствующие фазам генератора);  $K_3$  – субматрица размерности  $11 \times 1$ , определяющая по столбцу ветвь нагрузки ( $H_p$  – ребро графа, соответствующее ветви нагрузки) (рис. 3).

$V_p$	$\Gamma_p$								$H_p$
	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	1	-1	0	0	0	0	1	1	
2	1	0	-1	0	0	0	1	1	
3	1	0	0	-1	0	0	1	1	
4	1	0	0	0	-1	0	1	1	
5	1	0	0	0	0	-1	1	1	
6	1	0	0	0	0	0	0	1	
7	-1	1	0	0	0	0	-1	0	
8	-1	0	1	0	0	0	-1	0	
9	-1	0	0	1	0	0	-1	0	
10	-1	0	0	0	1	0	-1	0	
11	-1	0	0	0	0	1	-1	0	

Рис. 3. Фундаментальная матрица контуров  
Fig. 3. Fundamental contour matrix



На рис. 3 1  $V_X$  - хорды графа, соответствующие ветвям с вентилями 1-11.

Особенностью данного разбиения матрицы  $K$  является то, что в многофазной мостовой схеме выпрямления число вентиляй, равное  $K_v = 2m_f$  ( $m_f$  - число фаз МЭГ), на единицу больше числа независимых контуров  $m$ . Поэтому «избыток» вентиляй приходится включать в ребра дерева направленного графа. Это означает, что токи одного из вентиляй в мостовой схеме выпрямления становятся зависимыми от токов остальных вентиляй. Нелинейную модель вентиляй считаем заранее не заданной.

### Модель шестифазного магнитоэлектрического генератора с мостовым выпрямителем и активно-индуктивной нагрузкой на выходе

В соответствии с принятым разбиением матрицы  $K$  и с учетом замены напряжения на  $L_H$  на условной ЭДС нагрузки  $e_H = -L_H \frac{di_H}{dt}$  переменные и матрицы параметров обобщенной ветви схемы замещения ВГ разделяются на переменные и подматрицы по принадлежности к ребрам и хордам дерева графа следующим образом:

$i = [i_X^T \ i_p^T]^T$ ,  $e = [e_X^T \ e_p^T]^T$ ,  $z = \text{diag}\{z_x, z_p\}$ ,  
где  $i_X = [i_1 \ i_2 \dots \ i_{11}]^T$  – токи вентиляй 1-11;  $i_p = [i_{12} : i_{13} : \dots : i_{18} : i_{19}]^T = [i_{12} : i^{*T} : i_{19}]^T$ ;  $i_{12}$  – ток в ветви вентиля 12;  $i^* = [i_{a1} \ i_{b1} \ i_{c1} \ i_{a2} \ i_{b2} \ i_{c2}]$  – вектор фазных токов МЭГ размерности  $6 \times 1$ ;  $i_{19} = [i_H]$  – ток нагрузки;  $e_X = [0 \dots 0]^T$  – вектор с нулевыми элементами размерности  $11 \times 1$ ;  $e_p = [e_{13} \dots e_{18} : e_{19}]^T = [e^{*T} : e_{19}]^T$ ;  $e^* = [e_{a1} \ e_{b1} \ e_{c1} \ e_{a2} \ e_{b2} \ e_{c2}]^T$  – вектор обобщенных ЭДС, равный  $e^* = -\frac{d(L(t) \cdot i^*)}{dt} + e_M$ ;  $i_{19} = [e_H]$  – условная ЭДС нагрузки;  $Z_X = \text{diag}\{Z_1, \dots, Z_{11}\}$  – диагональная матрица полных сопротивлений вентиляй 1-11;  $Z_p = \text{diag}\{Z_{12}, : Z_{13}, \dots, Z_{18}, : Z_{19}\} = \text{diag}\{Z_{12}, : R^*, : Z_{19}\}$ ;  $Z_{12}$  – полное сопротивление вентиля 12;  $R^* = \text{diag}\{R_{a1} \ R_{b1} \ R_{c1} \ R_{a2} \ R_{b2} \ R_{c2}\}$  – диагональная матрица фазных сопротивлений МЭГ раз-

мерности  $6 \times 6$ ;  $R_{19} = [R_H]$  – активное сопротивление нагрузки.

Из топологического уравнения связи  $i_p = K^T i_X$  [4] имеем:

$$K_1^T i_X = i_{12}, \quad (2)$$

$$K_2^T i_X = i^*, \quad (3)$$

$$K_3^T i_X = i_{19}. \quad (4)$$

С учетом уравнений связи (3) перепишем выражение для вектора обобщенных ЭДС  $e^*$  в виде:

$$e^* = -\frac{dL(t)}{dt} \cdot K_2^T i_X - L(t) \cdot K_2^T \frac{di_X}{dt} + e_M. \quad (5)$$

Принимая во внимание принятное разделение переменных ветвей графа, из матричного уравнения (1), после подстановки в него соотношений (2) – (5), получим уравнения состояния исследуемого ВГ в каноничной форме:

$$\begin{aligned} & \left( K_2 \cdot L(t) \cdot K_2^T + K_3 L_H K_3^T \right) \cdot \frac{di_X}{dt} = \\ & \left\{ \begin{aligned} & Z_X(i_X) + K_1 Z_{12}(i_{12}) \cdot K_1^T + \\ & K_2 \left( R^* + \frac{dL(t)}{dt} \right) K_2^T + K_3 R_H K_3^T \end{aligned} \right\} + \\ & + i_X + K_2 e_M. \end{aligned} \quad (6)$$

Задаваясь в уравнениях (6) моделью вентиляй, окончательно получим полное математическое описание  $m_f$  – фазного МЭГ, работающего на мостовой выпрямитель и активно-индуктивную нагрузку:

1. Уравнения состояния размерности  $m \times 1$ :

1.1. Модель вентиля – пассивный двухполюсник –

$$\frac{di_X}{dt} = A^*(i_V, t) \cdot i_X + B^*(i_V, t) \cdot e_M, \quad (7)$$

где матрицы коэффициентов при векторе состояния и ЭДС, индуцируемых ПМ, равны:

– при  $R$ -модели вентиляй:  $Z_V = R_V(i_V)$

$$\begin{aligned} & A^*(i_V, t) = -C^*(t) \cdot \\ & \left\{ \begin{aligned} & R_X(i_X) + K_1 R_{12}(i_{12}) \cdot K_1^T + \\ & + K_2 \cdot \left( R^* + \frac{dL(t)}{dt} \right) \cdot K_2^T + K_3 R_H K_3^T \end{aligned} \right\}; \end{aligned}$$

$$B^*(i_V, t) = B^*(t) = C^*(t) K_2;$$

$$C^*(t) = (K_2 L(t) K_2^T + K_3 L_H K_3^T)^{-1};$$

где  $i_V = [i_1 \dots i_{12}]^T$  – вектор токов вентиляй размерности  $12 \times 1$ ;

$$R_V(i_V) = \text{diag}\{R_X(i_X), : R_{12}(i_{12})\},$$

где  $R_X(i_X)$  - диагональная матрица нелинейных активных сопротивлений вентиляй 1-11;

$R_{12}(i_{12})$  – нелинейное активное сопротивление вентиля 12;

– при  $R-L$  – модели вентиляй:

$$Z_V = R_V(i_V) + L_V(i_V) \cdot p, \quad p = \frac{d}{dt} \text{ - оператор диф-}$$

ференцирования.

$$A^*(i_V, t) = -C^*(i_V, t) \cdot \{R_X(i_X) + K_1 R_{12}(i_{12}) K_1^T + K_2 \left( R^* + \frac{dL(t)}{dt} \right) \cdot K_2^T + K_3 R_H K_3^T \}$$

$$B^*(i_V, t) = C^*(i_V, t) \cdot K_2;$$

$$C^*(i_V, t) = \left( \begin{array}{c} K_2 L(t) K_2^T + K_3 L_H K_3^T + \\ + L_X(i_X) + K_1 L_{12}(i_{12}) K_1^T \end{array} \right)^{-1};$$

$$L_V = \text{diag}\{L_X(i_X); L_{12}(i_{12})\};$$

где  $L_X(i_X)$  – диагональная матрица фиктивных индуктивностей вентиляй 1-11;  $L_{12}(i_{12})$  – фиктивная индуктивность вентиля 12.

1.2. Модель вентиля – идеальный ключ –

$$\left( K_2 L(t) K_2^T + K_3 L(t) K_3^T \right) \frac{di_X}{dt} + u_{VX} + K_1 u_{V12} = \left. \begin{array}{c} K_3 R_H K_3^T + \\ + K_2 \left( R^* + \frac{dL(t)}{dt} \right) \cdot K_2^T \end{array} \right\} i_X + K_2 e_M, \quad (8)$$

где  $u_{VX} = R_X(i_X) \cdot i_X$  – вектор напряжений ветвей

с вентилями 1-11 размерности  $11 \times 1$ ;

$u_{V12} = R_{12}(i_{12}) \cdot i_{12}$  – напряжение в ветви вентиля 12.

Для вентиля, проводящего в конкретный момент времени ток, напряжение в ветви равно нулю.

2. Уравнение связи:

$$\left. \begin{array}{l} i^* = K_2^T i_X, \\ i_{12} = K_1^T i_X, \\ i_H = K_3^T i_X \end{array} \right\} \quad (9)$$

4. Уравнение нагрузки (рис. 4):

$$u_H = R_H i_H + L_H K_3^T \cdot \frac{di_X}{dt}. \quad (10)$$

На основе (9) – (10) и (7), соответствующих выбранной  $RL$ -модели вентиляй [1], была разработана универсальная математическая модель (ММ) шестифазного МЭГ с мостовой схемой выпрямления. По составленной модели разработан программный комплекс, основные блоки которого соответствуют стандартным модулям [1]. Расчеты по формулам (7), (9) – (10) выполнялись в относительных единицах. Время численного интегрирования при настроенных коэффициентах:  $\alpha = 1/267$ ,  $K_Q = 0,01$  было равно 1,5 – 2 минутам за один период изменения ЭДС. Межкоммутационный шаг автоматически изменялся в пределах 4,0 – 4,2 эл.

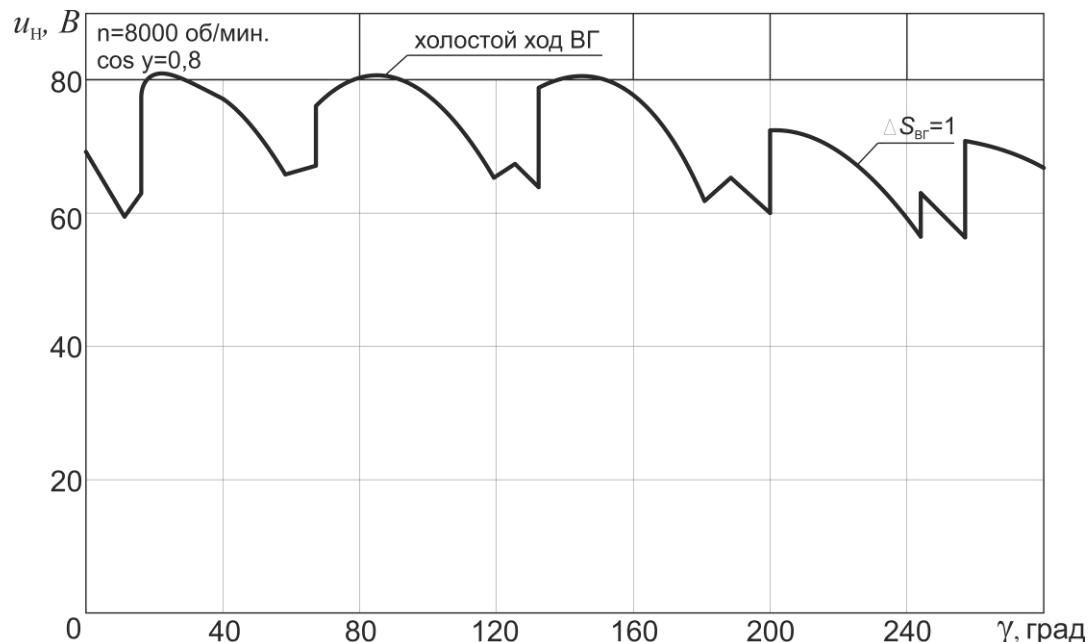


Рис. 4. Напряжение на выходе при изменении режима генератора от холостого хода до номинальной нагрузки

Fig. 4. Output voltage while changing generator mode from idling to nominal load

Анализ диаграмм линейных и фазных напряжений для трехфазной и шестифазной мостовых схем выпрямления (см. рис. 2) позволяет говорить об идентичности электромагнитных процессов, имеющих место в трехфазном и шестифазном ВГ с симметричной статорной обмоткой. Отличие заключается в том, что в трехфазном ВГ фазные напряжения сдвинуты относительно линейных на угол в  $30^\circ$ , т.е.  $U_{\text{lm}} = 2U_{\text{fm}} \cos 30^\circ = \sqrt{3} U_{\text{fm}}$ , тогда как в шестифазном ВГ эти напряжения совпадают по направлению, и максимальное линейное напряжение равно  $U_{\text{lm}} = 2U_{\text{fm}}$ .

Справедливость этого факта подтверждается графиком функций  $u_{\text{H}} = f(\gamma)$  (см. рис. 4) для случая холостого хода ВГ:  $\cos\varphi=0,8$ ;  $R_{\text{H}}=100$  Ом;  $U_{\text{fm}}=40,3$  В и наброса нагрузки  $\Delta S_{\text{BГ}}=1$  ( $\Delta S_{\text{BГ}}=R_{\text{НОМ}}/R_{\text{H}}$ ).

Моделирование показывает, что в исследуемой мостовой схеме основные режимы проводимости вентилей следующие:

- режим с проводимостью вентилей 2–3 ( $\gamma_{\text{K}} < 30^\circ$ ,  $\gamma_{\text{П}} < 120^\circ$ );
- режим с проводимостью вентилей 2–4 ( $30^\circ \leq \gamma_{\text{K}} < 60^\circ$ ,  $120^\circ \leq \gamma_{\text{П}} < 180^\circ$ );
- режим с проводимостью вентилей по 4 ( $\gamma_{\text{K}}=60^\circ$ ,  $\gamma_{\text{П}}=180^\circ$ ).

Режим проводимости 2–3 поясняется зависимостями  $u_{\text{vj}} = f(\gamma)$  и циклограммой работы вентилей (рис. 5) для случая наброса и сброса номинальной нагрузки ( $\Delta S_{\text{BГ}}=1$ ,  $\cos\varphi = 0,8$ ).

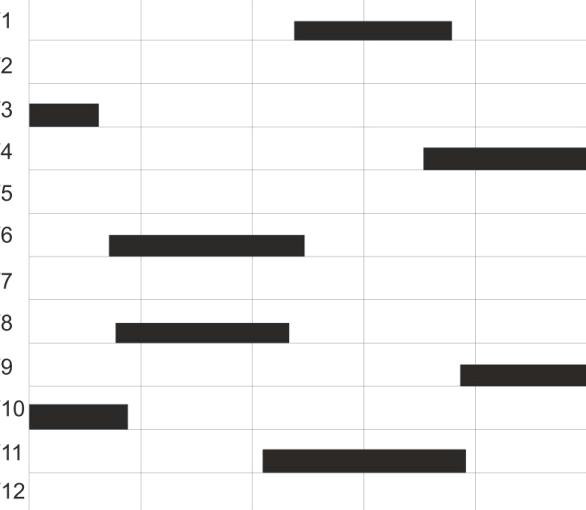
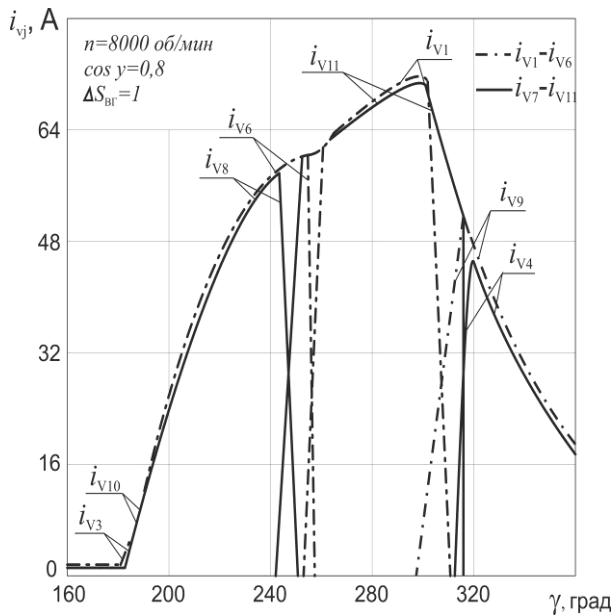


Рис. 5. Токи вентилей, нагрузки и циклограмма работы выпрямителя при коммутациях номинальной нагрузки

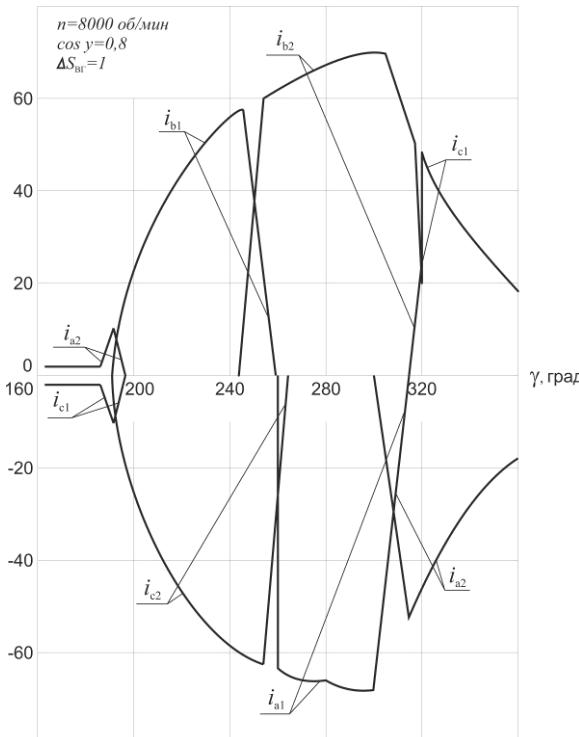
Fig. 5. Valve currents, loads and rectifier operation cyclogram under commutations of a nominal load

Из циклограммы видно, что данный режим соответствует чередованию одиночной работы вентилей и их коммутации ( $\gamma_{\text{K}} = 5 - 12,7^\circ$ ) в пределах катодной или анодной групп. По времени интервалы коммутации в этих группах вентилей не совпадают между собой. Причиной задержки коммутации вентилей в одной из групп из шести вентилей является снижение напряжения в проводящем межфазном контуре при коммутации вентилей в другой группе.

При углах перекрытия вентилей от  $\gamma_{\text{K}} = 30^\circ$  в схеме устанавливается режим 2–4, являющийся основным режимом работы исследуемого ВГ.

Режим с проводимостью 2–4 приведен в [2] и поясняется по циклограмме переключательной схемы шестифазного мостового выпрямителя при его представлении нелинейной резистивной системой. Соответствие рассмотренных режимов с аналогичными режимами проводимости вентилей в шестифазной мостовой схеме ВГ устанавливается по табл. и зависимости  $i_{\text{vj}} = f(\gamma)$  при набросе и сбросе нагрузки:  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $\Delta S_{\text{BГ}} = 1$  (рис. 6).

При дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки вентили начинают проводить группами по 4 ( $\gamma_{\text{K}}=60^\circ$ ). Данный режим проводимости вентилей сохраняется вплоть до возникновения аварийных режимов.



**Рис. 6.** Токи фаз генератора при коммутациях номинальной нагрузки  
**Fig. 6.** Currents of generator phases under commutations of nominal loads

Соответствие типа вентильной системы и проводимости вентилем при максимальном линейном напряжении

Correspondence of the valve system type and valve conductivity under maximum linear voltage

Тип вентильной системы	Проводимость вентилем при максимальном линейном напряжении					
	$u_{a_1b_2}$	$u_{a_2c_1}$	$u_{b_1c_2}$	$u_{b_2a_1}$	$u_{c_1a_2}$	$u_{c_2b_1}$
Вентильный генератор как резистивная система	7-4	8-5	9-6	10-1	11-2	12-3
Вентильный генератор	7-5	10-3	8-6	11-1	9-4	12-2

## Заключение

Таким образом, предложенный в работе подход к математическому описанию ВГ на основе принятой в [1] методики математического моделирования позволяет исследовать электромагнитные процессы в МЭГ с многофазным мостовым выпрямителем во всем ди-

апазоне изменения нагрузок: от режима холостого хода до режима внешнего короткого замыкания генератора.

Ряд близких и смежных вопросов моделирования объектов такой физической природы рассмотрен в работах [5 – 18].

## Список литературы

1. Данеев А.В., Данеев Р.А., Сизых В.Н. Моделирование многофазных синхронных машин в различных системах координат // Изв. Самар. науч. центра Рос. Акад. наук. 2020. Т. 22. № 4. С. 104–115.
2. Дедовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М. : Энергоатомиздат, 1985. 168 с.
3. Вайман М.Я. и др. Некоторые вопросы упрощения математического описания автономной электроэнергетической системы // Изв. ВУЗов СССР. Сер. Энергетика. 1974. №11. С. 8–15.
4. Ильин В.Н. Машинное проектирование электронных схем. М. : Энергия, 1972. 274 с.
5. Важнов А.Ш. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л. : Энергия, 1980. 320 с.
6. Якубович В.А., Старжинский В.М. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения. М. : Наука, 1972. 720 с.

7. Лупкин В.М. Аналитическое решение линейных дифференциальных уравнений вентильного двигателя // Электротехника. 1981. № 6. С. 22–31.
8. Бреус К.А. О приводимости канонической системы дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами // АН СССР. 1958. Т. 123. № 1. С. 21–24.
9. Daneev A.V., Sizykh V.N., Oboltin R.U. Parametric synthesis of stabilizing neuroocular control of a technological module // IOP Conf. Series: 2094. 2021. P. 1–6. DOI:10.1088/1742-6596/2094/5/052066.
10. Данеев А.В., Сизых В.Н. Алгоритмическое обеспечение конструирования оптимальных регуляторов по неклассическим функционалам качества в вырожденной формулировке // Информационные технологии, их приложения и информационное образование : материалы II Междунар. науч. конф. Улан-Удэ, 2021. С. 74–79.
11. Daneev A.V., Sizykh V.N. Associating automat for technological processes adaptive control on based of neural networks // Helix The scientific Explorer. 2018. Vol. 8 (2). P. 3046–3054.
12. Александров А.А., Данеев Р.А., Сизых В.Н. К вопросу моделирования вентильных синхронных машин на основе квазианалитического метода // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2019. Т. 21. № 4. С. 63–69.
13. Дижур Д.П. Цифровое моделирование электропередач постоянного тока // Передача энергии постоянным током. М. : Энергоатомиздат, 1985. С. 51–63.
14. Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноруцкий И.Г. Численные методы решения жестких систем. М. : Наука, 1979. 208 с.
15. Демирчян К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. М. : Высш. шк., 1988. 335 с.
16. Конев Ф.Б., Ярлыкова Н.Е. Методы численного решения систем дифференциальных уравнений, применяемые в цифровых моделях вентильных преобразователей // Итоги науки и техники. Сер. Силовая преобразовательная техника. М. : Информэлектро, 1978. 50 с.
17. Лукин В.Н., Романов М.Ф., Толкачев Э.А. Системный анализ электрических цепей и машин. Л. : Изд-во ЛГУ, 1985. 136 с.
18. Беляев П.В. Некоторые свойства математических моделей динамики статических преобразователей энергии // Динамика электрических машин. Омск : ОПИ, 1984. С. 68–74.

### References

1. Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N. Modelirovaniye mnogofaznykh sinkhronnykh mashin v razlichnykh sistemakh koordinat [Modeling of multi-phase synchronous machines in different coordinate systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2020, vol. 22, no 4, pp. 104 – 115.
2. Dedovskiy A.N. Elektricheskie mashiny s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami [Electrical machines with high-coercivity permanent magnets]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1985. 168 p.
3. Vayman M.Ya. and others. Nekotorye voprosy uproscheniya matematicheskogo opisaniya avtonomnoy elektroenergeticheskoi sistemy [Some questions of simplifying the mathematical description of an autonomous electric power system]. *Izvestiya VUZov SSSR. Seriya Energetika* [Bulletin of Universities of the USSR, ser. Energy]. 1974, no 11, pp.8-15.
4. Il'in V.N. Mashinnoe proektirovaniye elektronnykh skhem [Machine design of electronic circuits]. Moscow: Energiya Publ., 1972. 274 p.
5. Vazhnov A.Sh. Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka [Transient processes in AC machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1980. 320 p.
6. Yakubovich V.A., Starzhinskii V.M. Lineynye differenttsial'nye uravneniya s periodicheskimi koefitsientami i ikh prilozheniya [Linear differential equations with periodic coefficients and their applications]. Moscow: Nauka Publ., 1972. 720 p.
7. Lupkin V.M. Analiticheskoe reshenie lineynykh differenttsial'nykh uravneniy ventil'nogo dvigatelya [Analytical solution of linear differential equations of a brushless motor]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1981, no 6, pp. 22-31.
8. Breus K.A. O privodimosti kanonicheskoy sistemy differenttsial'nykh uravneniy s periodicheskimi koefitsientami [On the reducibility of a canonical system of differential equations with periodic coefficients]. *AN SSSR* [AS of USSR]. 1958, vol. 123, no 1, pp. 21-24.
9. Daneev A.V., Sizykh V.N., Oboltin R.U. Parametric synthesis of stabilizing neuroocular control of a technological module // IOP Conf. Series: 2094 (2021). Pp. 1-6. 052066. doi:10.1088/1742-6596/2094/5/052066.
10. Daneev A.V., Sizykh V.N. Algoritmicheskoe obespechenie konstruirovaniya optimal'nykh regul'uatorov po neklassicheskim funktsionalam kachestva v vyrozhdennoy formulirovke [Algorithmic support for designing optimal controllers based on non-classical quality functionals in a degenerate formulation]. *Materialy II Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Informatsionnye tekhnologii, ikh prilozheniya i informatsionnoe obrazovaniye»* [Proceedings of Second International Conference «Information technologies, their applications and information education»]. Ulan-Ude: Buryat State University named after Dorzhi Banzarov Publ., 2021, pp. 74-79.
11. Daneev A.V., Sizykh V.N. Associating automat for technological processes adaptive control on based of neural networks // Helix The scientific Explorer. Vol. 8(2), 2018. Pp. 3046-3054.
12. Aleksandrov A.A., Daneev R.A., Sizykh V.N. K voprosu modelirovaniya ventil'nykh sinkhronnykh mashin na osnove kvazianaliticheskogo metoda [On the issue of modeling valve synchronous machines based on a quasi-analytical method]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2019, vol. 21, no 4, pp. 63-69.

13. Dizhur D.P. Tsifrovoe modelirovaniye elektroperedach postoyannogo toka [Digital modeling of direct current power transmission]. *Peredacha ehnergii postoyannym tokom* [Energy transmission by direct current]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, pp. 51–63.
14. Rakitskii Yu.V., Ustinov S.M., Chernorutskii I.G. Chislennye metody resheniya zhestkikh sistem [Numerical methods for solving stiff systems]. Moscow: Nauka Publ., 1979. 208 p.
15. Demirchyan K.S., Butyrin P.A. Modelirovaniye i mashinnyi raschet elektricheskikh tsepei [Modeling and machine calculation of electrical circuits]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988. 335 p.
16. Konev F.B., Yarlykova N.E. Metody chislennogo resheniya sistem differentials'nykh uravnenii, primenyaemye v tsifrovyykh modelyakh ventil'nykh preobrazovatelei [Methods for the numerical solution of systems of differential equations used in digital models of valve converters]. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. «Silovaya preobrazovatel'naya tekhnika»* [Results of science and technology. Ser. «Power converting technology»]. Moscow: Informelectro Publ., 1978. 50 p.
17. Lukin V.N., Romanov M.F., Tolkachev E.A. Sistemnyi analiz elektricheskikh tsepei i mashin [System analysis of electrical circuits and machines]. Leningrad: LGU Publ., 1985. 136 p.
18. Belyaev P.V. Nekotorye svoistva matematicheskikh modelei dinamiki staticheskikh preobrazovatelei energii [Some properties of mathematical models of the dynamics of static energy converters]. *Dinamika ehlektricheskikh mashin* [Dynamics of electrical machines]. Omsk: OPI, 1984, pp. 68–74.

### Информация об авторах

**Данеев Алексей Васильевич**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: daneev@mail.ru

**Данеев Роман Алексеевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-правовых дисциплин, Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск, e-mail: romasun@mail.ru

**Сизых Виктор Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sizykh\_vn@mail.ru

### Information about the authors

**Alexei V. Daneev**, Doctor of Engineering Science, Professor, the Full Professor of Department «Information Systems and Information Protection», Irkutsk State Transport University, Irkutsk e-mail: daneev@mail.ru

**Roman A. Daneev**, Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor of Department «Information and Legal Disciplines», East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Irkutsk, e-mail: romasun@mail.ru

**Victor N. Sizykh**, Doctor of Engineering Science, Professor, the Full Professor of Department «Automation of Production Processes», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sizykh\_vn@mail.ru

## Механическая мощность при гармонических воздействиях

В. Д. Павлов<sup>✉</sup>

Владимирский электромеханический завод, г. Владимир, Российская Федерация

<sup>✉</sup> pavlov.val.75@mail.ru

### Резюме

Цель исследования состоит в детализации видов механической мощности при гармонических колебаниях. В силу необратимости тепловой энергии ее производная принимает только положительные значения. Вместе с тем производные могут быть взяты как от потенциальной, так и от кинетической энергии. Однако наиболее интересный случай представляют гармонические колебания, при которых производные (мгновенные мощности) необходимо являются знакопеременными функциями, что принципиально отличает их от тепловой мощности. Аналогом кинетической энергии в электротехнике является энергия магнитного поля катушки индуктивности, аналогом потенциальной энергии – энергия электрического поля конденсатора, а механическую тепловую энергию заменяет тепловая же энергия, рассеиваемая резистором. Показано, что при механических колебаниях развивается не только знакоположительная тепловая мощность, но и знакопеременные реактивные мощности, характеризующие обратимость кинетической и потенциальной энергий. Под активной мощностью понимается среднее за полпериода значение мгновенной мощности, а под реактивной – амплитудное значение. Полная механическая мощность, с одной стороны, описывается формулой Пифагора, а с другой – равна произведению действующих значений гармонических величин. Особенностью комплексного представления является то, что при вычислении полной мощности один из перемножаемых векторов должен быть сопряженным. Представление о механических реактивных, активной и полной мощностях – обобщение соответствующих понятий из электротехники, что является проявлением электромеханического дуализма. Поскольку приводы машин и механизмов преимущественно электромеханические, механическая реактивная мощность трансформируется в электрическую реактивную мощность сети, ухудшая качество электроэнергии. В этой связи учет механической реактивной мощности имеет немаловажное значение.

### Ключевые слова

механическая мощность, кинетическая энергия, потенциальная энергия, комплексное представление, векторное представление

### Для цитирования

Павлов В. Д. Механическая мощность при гармонических воздействиях / В. Д. Павлов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 30–38. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).30-38

### Информация о статье

поступила в редакцию: 18.02.2022 г.; поступила после рецензирования: 22.03.2022 г.; принята к публикации: 23.03.2022 г.

## Mechanical power under harmonic influences

V. D. Pavlov<sup>✉</sup>

Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, the Russian Federation

<sup>✉</sup> pavlov.val.75@mail.ru

### Abstract

The purpose of the study is to detail the types of mechanical power under harmonic oscillations. Due to the irreversibility of thermal energy, its derivative takes only positive values. At the same time, derivatives can be taken from both potential and kinetic energy. Wherein, the most interesting case is presented by harmonic oscillations, with the derivatives (instantaneous powers) necessarily being sign-changing functions, which fundamentally distinguishes them from thermal power. An analogue of kinetic energy in electrical engineering is the energy of the magnetic field of an inductor, an analogue of potential energy is the energy of the electric field of a capacitor, and an analogue of mechanical thermal energy is the thermal energy dissipated by a resistor. It is shown that during mechanical vibrations, not only a sign-positive thermal power develops, but sign-alternating reactive powers, characterizing the reversibility of the kinetic and potential energies do as well. Active power is understood as the average value of instantaneous half period power, while reactive power is an amplitude value. The total mechanical power, on the one hand, is described by the Pythagorean formula, and on the other hand, it is equal to the product of the effective values of the harmonic quantities. The peculiarity of the complex representation is that when calculating the total power, one of the multiplied vectors must be conjugate. The concept of mechanical reactive, active and apparent power is a generalization of the corresponding concepts from electrical engineering, which is a manifestation of electro-mechanical dualism. Since the drives of machines and mechanisms are predominantly electromechanical, the mechanical reactive power is transformed into the electrical reactive power of the network, degrading the quality of electricity. In this regard, the consideration of mechanical reactive power is of no small importance.

**Keywords**

mechanical power, kinetic energy, potential energy, complex representation, vector representation

**For citation**

Pavlov V. D. Mekhanicheskaya moshchnost' pri garmonicheskikh vozdeystviyakh [Mechanical power under harmonic influences]. Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 30–38. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).30-38

**Article Info**

Received: 18.02.2022; revised: 22.03.2022; accepted: 23.03.2022.

**Введение**

Механическая энергия бывает обратимой – потенциальная и кинетическая, а также необратимой, например, тепловая при трении. В качестве механической мощности принято считать временную производную от последней. В силу необратимости тепловой энергии ее производная принимает только положительные значения.

Вместе с тем, производные могут быть взяты как от потенциальной, так и от кинетической энергии. Наиболее интересный случай представляют гармонические колебания [1–4], при которых производные (мгновенные мощности) являются знакопеременными функциями, что принципиально отличает их от тепловой мощности.

Аналогом кинетической энергии в электротехнике является энергия магнитного поля катушки индуктивности, аналогом потенциальной энергии – энергия электрического поля конденсатора, а аналогом механической тепловой энергии – тепловая же энергия, рассеиваемая резистором.

Цель исследования состоит в детализации видов механической мощности при гармонических колебаниях.

Актуальность работы обусловлена тем, что механические колебания широко распространены в разнообразных технологических процессах [5–10]. Поскольку приводы машин и механизмов являются преимущественно электромеханическими, механическая реактивная мощность трансформируется в электрическую реактивную мощность сети [11–13], ухудшая качество электроэнергии [14–17]. В этой связи учет механической реактивной мощности имеет немаловажное значение.

**Методика**

В 1873 г. Максвелл ввел первую (из двух) систему электромеханических аналогий:

- $v$  (скорость)  $\rightarrow I$  (ток);
- $F$  (сила)  $\rightarrow U$  (напряжение);
- $m$  (масса)  $\rightarrow L$  (индуктивность);
- $k$  (коэффициент упругости)  $\rightarrow 1/C$  ( $C$  – емкость);
- $r$  (коэффициент вязкого сопротивления)  $\rightarrow R$  (сопротивление).

В 1919 г. Вебстер ввел в механику заимствованное из электротехники понятие о механических реактансах, являющихся аналогами электрических реактивных сопротивлений:

- $\omega L$  (инертный реактанс)  $\rightarrow \omega L$  (индуктивное сопротивление);
- $k/\omega$  (упругий реактанс)  $\rightarrow 1/(\omega C)$  (емкостное сопротивление).

В соответствии с представленной системой аналогий формула закона Ома для участка электрической цепи  $U = IZ$ ,

где  $Z = \sqrt{[\omega L - 1/(\omega C)]^2 + R^2}$  – полное сопротивление, имеет дуально механическое выражение:

$$F = V_z,$$

где  $z$  – полное механическое сопротивление или механический импеданс (impedance) –

$z = \sqrt{(m\omega - k/\omega)^2 + r^2}$  ( $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$ ), как в силу дуального соответствия, так и потому, что в его состав входят инертный и упругий реактансы.

Механический реактанс (reactance):

$$x = m\omega - \frac{k}{\omega}.$$

При  $x = 0$  получается известная формула  $z = \sqrt{k/m}$ .

Имеет место резонанс сил, если при этом  $r = 0$ , то и  $z = 0$ . Физический смысл этого состоит в том, что система не оказывает сопротивления внешнему силовому гармоническому воздействию [18].

В основе дальнейшего рассмотрения лежит электромеханический дуализм или изоморфность в математическом смысле электрических и механических явлений и процессов.

Мгновенная механическая мощность, равная производной по времени от кинетической энергии инертного тела, вычисляется как:

$$q_m = \frac{d}{dt} \left( \frac{mv^2}{2} \right) = mv \frac{dv}{dt} = mav = f_a v.$$

Другими словами, мгновенная механическая мощность равна произведению мгновенных значений силы и скорости, что и будет использовано в дальнейшем.

### Мощность, развиваемая при вынужденных гармонических колебаниях инертного тела

Движение тела описывается известным выражением:

$$x = l \sin \omega t.$$

Соответственно, мгновенная скорость определяется как:

$$v = \dot{x} = \omega l \cos \omega t = v_m \cos \omega t.$$

В электротехнике установлено, что для гармонической величины действующее значение меньше амплитудного в  $\sqrt{2}$ :

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega l}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

В соответствии с основной аксиомой механики, известной как второй закон Ньютона, формула для силы имеет вид:

$$f_a = m\ddot{x} = -m\omega^2 l \sin \omega t \quad (2)$$

Формула для силы трения, пропорциональной скорости:

$$f_\mu = \mu \dot{x} = \mu \omega l \cos \omega t. \quad (3)$$

Результирующая сила равна сумме сил в соответствии с формулами (2) и (3):

$$f = f_a + f_\mu = -m\omega^2 l \sin \omega t + \mu \omega l \cos \omega t = \\ = \omega l \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} \cdot \left( \frac{\mu}{\sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}} \cos \omega t - \frac{m\omega}{\sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}} \sin \omega t \right).$$

Для удобства дальнейших преобразований можно обозначить:

$$\varphi = \arctg \frac{m\omega}{\mu}.$$

С учетом этого выражение для результирующей силы примет вид:

$$f = \omega l \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} (\cos \varphi \cdot \cos \omega t - \sin \varphi \cdot \sin \omega t) = \\ = \omega l \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} \cdot \cos(\varphi + \omega t).$$

Очевидно, что амплитуда мгновенного значения силы находится как

$$F_m = \omega l \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}.$$

Действующее значение результирующей силы по аналогии с выражением для скорости (1) равно:

$$F = \frac{F_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega l \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}}{\sqrt{2}}. \quad (4)$$

Мгновенная результирующая мощность при вынужденных гармонических колебаниях инертного тела будет иметь следующий вид:

$$s = fv = \omega l \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} \cos(\omega t + \varphi) \omega l \cos \omega t = \\ = 0,5 \omega^2 l^2 \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} [\cos(2\omega t + \varphi) + \cos \varphi] = \\ = FV [\cos(2\omega t + \varphi) + \cos \varphi] = \\ = FV (\cos \varphi + \cos 2\omega t \cos \varphi - \sin 2\omega t \sin \varphi) = \\ = FV \cos \varphi (1 + \cos 2\omega t) - FV \sin \varphi (1 + \sin 2\omega t) = \\ = p + q_i.$$

В электротехнике есть выражение для мгновенной электрической мощности, аналогичное (5) с заменами:

$$F \rightarrow U, V \rightarrow I.$$

В соответствии с ним определяют активную электрическую мощность:

$$P = UI \cos \varphi,$$

поэтому активную (тепловую) механическую мощность тоже следует определять как

$$P = FV \cos \varphi. \quad (6)$$

Очевидно, что гармонические сила и скорость совершают колебания со сдвигом фаз, равным  $\varphi$ . В электроэнергетике величина  $\cos \varphi$  играет ключевую роль для определения качества электроэнергии.

Из приведенной формулы определяют реактивную электрическую мощность:

$$P = UI \cos \varphi.$$

Поэтому реактивную (инерционную) механическую мощность тоже следует определять как:

$$Q_i = FV \sin \varphi. \quad (7)$$

Из формулы (5) следует, что под активной мощностью понимается среднее за полпериода значение мгновенной мощности, а под реактивной – амплитудное значение. В электротехнике все обстоит аналогичным образом.

Другим обобщением из электротехники является полная механическая мощность:

$$S = FV = \sqrt{Q_i^2 + P^2}. \quad (8)$$

Она примечательна тем, что, с одной стороны, описывается формулой Пифагора, а с другой – равна произведению действующих значений гармонических величин.

Имея в виду (1), (5) и (8):

$$Q_i = FV \sin \varphi = \frac{\omega l \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\omega l}{\sqrt{2}} \cdot \frac{m \omega}{\sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}} = \frac{ml^2 \omega^3}{2}. \quad (9)$$

При этом:

$$f_a v = -ml\omega^2 \sin \omega t \cdot \omega l \cdot \cos \omega t = -0.5ml^2 \omega^3 \sin 2\omega t = -F_a V \sin 2\omega t = -Q_i \sin 2\omega t.$$

Это соответствует выражениям (5) и (9).

Имея в виду (1), (4) и (6):

$$P = FV \cos \varphi = \frac{\omega l \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\omega l}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\mu}{\sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}} = \frac{\mu l^2 \omega^2}{2}. \quad (10)$$

При этом:

$$f_\mu v = \mu \omega l \cos \omega t \cdot \omega l \cdot \cos \omega t = 0.5\mu \omega^2 l^2 \cdot (1 + \cos 2\omega t) = F_\mu V \cdot (1 + \cos 2\omega t) = P \cdot (1 + \cos 2\omega t).$$

Это соответствует выражениям (5) и (10).

Имея в виду (8), (9) и (10):

$$S = FV = \frac{\omega l \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\omega l}{\sqrt{2}} = \frac{\omega^2 l^2 \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}}{2}.$$

### Мощность, развиваемая при упругих деформациях

Выражение для силы имеет вид:

$$f_k = kx = kl \sin \omega t.$$

Имея в виду (3), результирующая механическая сила будет вычисляться как

$$f = f_k + f_\mu = kl \sin \omega t + \mu \omega l \cos \omega t = l \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2} \cdot \left( \frac{k}{\sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}} \sin \omega t + \frac{\mu \omega}{\sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}} \cos \omega t \right).$$

Для удобства дальнейших преобразований можно обозначить:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{k}{\mu \omega}.$$

С учетом этого выражение для результирующей силы примет вид:

$$f = l \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2} (\sin \varphi \cdot \sin \omega t + \cos \varphi \cdot \cos \omega t) = l \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2} \cdot \cos(\omega t - \varphi).$$

Очевидно, что амплитуда мгновенного значения силы имеет вид:

$$F_m = l \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}.$$

Действующее значение результирующей силы по аналогии с выражением для скорости (1) равно:

$$F = \frac{F_m}{\sqrt{2}} = \frac{l \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}}{\sqrt{2}}. \quad (11)$$

Мгновенная результирующая мощность при вынужденной гармонической деформации упругого тела определяется как

$$s = fv = l \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2} \cdot \cos(\omega t - \varphi) \cdot \omega l \cdot \cos \omega t = 0.5 \omega l^2 \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2} \cdot [\cos(2\omega t - \varphi) + \cos \varphi] = FV \cdot [\cos(2\omega t - \varphi) + \cos \varphi] = FV \cdot (\cos \varphi + \cos 2\omega t \cdot \cos \varphi + \sin 2\omega t \cdot \sin \varphi) = FV \cdot \cos \varphi \cdot (1 + \cos 2\omega t) + FV \cdot \sin \varphi \cdot (1 + \sin 2\omega t) = p + q_d. \quad (12)$$

Имея в виду (5), (6) и (10), активная механическая мощность будет находиться как:

$$P = FV \cos \varphi = \frac{l \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\omega l}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\mu \omega}{\sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}} = \frac{\mu \omega^2 l^2}{2}.$$

Принимая во внимание (1), (7), (11) и (12), механическая реактивная (упругая) мощность будет иметь следующий вид:

$$Q_d = FV \sin \varphi = \frac{l \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\omega l}{\sqrt{2}} \cdot \frac{k}{\sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}} = \frac{k \omega l^2}{2}. \quad (13)$$

При этом:

$$f_k v = kl \sin \omega t \cdot \omega l \cdot \cos \omega t = 0.5kl^2 \omega \sin 2\omega t = F_k V \sin 2\omega t = Q_d \sin 2\omega t.$$

Это соответствует выражениям (12) и (13).

Очевидно, что полная мощность равна:

$$S = FV = \sqrt{Q_d^2 + P^2} = \frac{l^2 \omega \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}}{2}.$$

## Мощность при колебаниях, связанных с гравитационным воздействием

При отклонении на угол  $\alpha$  груза, подвешенного на нити длиной  $L$ , возникает момент:

$$M = mgLa.$$

Пусть  $\alpha = \alpha_0 \cdot \sin \omega t$ .

Тогда:

$$\dot{\alpha} = \alpha_0 \omega \cdot \cos \omega t = \alpha_0 \sqrt{\frac{g}{L}} \cos \omega t.$$

Мгновенная мощность имеет вид:

$$\begin{aligned} q_g &= M\dot{\alpha} = mgLa_0 \sin \omega t \cdot \alpha_0 \sqrt{\frac{g}{L}} \cos \omega t = \\ &= 0,5m\alpha_0^2 \sqrt{g^3 L} \sin 2\omega t. \end{aligned}$$

Ее амплитуда и, соответственно, реактивная мощность гравитационного воздействия определяется как:

$$Q_g = 0,5m\alpha_0^2 \sqrt{g^3 L}.$$

## Реактивная, активная и полная мощности в комплексном представлении

По аналогии с электротехникой гармоническую величину можно представить в виде:

$$a = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) = \text{Im}[Ae^{i(\omega t + \varphi)}],$$

где  $Ae^{i(\omega t + \varphi)}$  – вращающийся в комплексной плоскости вектор.

Векторы в комплексной плоскости принято изображать для нулевого момента времени. При этом величина:

$$Ae^{i(\omega t + \varphi)} = Ae^{i\varphi} = A.$$

называется комплексной амплитудой [18].

В [19] показано, что при инертной нагрузке:

$$\dot{V}_m = V_m e^{j\pi/2}.$$

Мгновенная скорость при этом равна:

$$v = V_m \cos \omega t = \text{Im} \dot{V}_m.$$

Формулы для действующих значений величин принципиально не отличаются:

$$\dot{V} = V e^{j\pi/2}, \dot{F} = F e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)}.$$

Особенностью комплексного представления, подробно описанного в электротехнике, является то, что при вычислении полной мощности один из перемножаемых векторов должен быть *сопряженным*.

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \dot{F} \cdot \dot{V} = F e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)} \cdot V e^{-j\pi/2} = F V e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \varphi - \frac{\pi}{2}\right)} = F V e^{j\varphi} \\ &= F V \cos \varphi + j F V \sin \varphi = P + j Q_i. \end{aligned}$$

Это выражение для инертной нагрузки. Отличием упругой нагрузки является то, что реактивная мощность имеет противоположный знак:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \dot{F} \cdot \dot{V} = F e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} \cdot V e^{-j\pi/2} = F V e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \varphi - \frac{\pi}{2}\right)} = \\ &= F V e^{-j\varphi} = F V \cos \varphi - j F V \sin \varphi = P + j Q_d. \end{aligned}$$

При этом:

$$\begin{aligned} P &= \text{Re} \dot{F} \cdot \dot{V}, \\ Q &= \text{Im} \dot{F} \cdot \dot{V}. \end{aligned}$$

## Механические реактансы

Пусть к массивному исполнительному органу машины или механизма приложена:

$$f = F_m \cos \omega t. \quad (14)$$

В соответствии с основной аксиомой механики:

$$\begin{aligned} F_m \cos \omega t &= m \frac{dv}{dt}; \int_0^v dv = \frac{F_m}{m} \int_0^t \cos \omega t dt, \\ v &= \frac{F_m}{\omega m} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned}$$

Из этого следует, что амплитуда имеет вид:

$$V_m = \frac{F_m}{\omega m} = \frac{F_m}{X_m},$$

где  $X_m$  – инертный реактанс,  $\text{кг} \cdot \text{рад/с}$ .

Полученное выражение можно представить в комплексном виде [20]:

$$\dot{V} = -i \frac{F_m}{\omega m} = \frac{F_m}{i\omega m} = \frac{F_m}{\underline{X}_m}. \quad (15)$$

Знак « $-i$ » обусловлен тем, фаза мгновенной скорости отстает от фазы силы на  $\pi/2$ . Комплексные величины, соответствующие синусоиде, обозначаются точкой сверху, прочие – подчеркиваются снизу.

В соответствии с (15) инертный реактанс имеет вид:

$$\underline{X}_m = i\omega m.$$

Он характеризует свойство массивного тела оказывать сопротивление приводу, заставляющему его совершать колебания. Вполне закономерно, что он определяется массой и частотой.

В соответствии с выражением (14) вектор силы ориентирован вдоль вещественной оси комплексной плоскости, поэтому в соответствии с формулой (15) вектор скорости ориентирован вдоль мнимой оси (т.е. скорость – чисто

мнимая). Мгновенное значение реактивной (инерционной) мощности:

$$q_i = f v.$$

Эта величина является мнимой, поскольку является произведением мнимой величины  $v$  на действительную  $f$ .

Реактивная (инерционная) мощность в комплексном виде:

$$\dot{Q}_i = \dot{F} \cdot \dot{V}. \quad (16)$$

Реактивная (инерционная) мощность:

$$Q_i = \frac{F^2}{X_m} = V^2 X_m.$$

Сила трения определяется формулой  $f = \mu v$ , отсюда скорость вычисляется как

$$v = \frac{f}{\mu}.$$

Поскольку вектор силы ориентирован вдоль вещественной оси комплексной плоскости (14) и  $\mu$  – вещественная величина, величина  $v$  является тоже вещественной.

Мгновенное значение активной (тепловой) мощности:

$$p = f v.$$

Активная мощность тоже вещественная величина, поскольку является произведением вещественных величин.

### Активная мощность в комплексном виде

В соответствии с (15) и (16) реактивная (инерционная) мощность представляет собой чисто мнимую величину:

$$\dot{Q}_i = \dot{F} \cdot \dot{V} = -i \frac{(\dot{F})^2}{\omega m}.$$

Активная (тепловая) мощность при любом характере движения, например, развивающаяся силой трения скольжения, является вещественной величиной. В этой связи реактивная и активная мощности являются условно «ортогональными». Следовательно, полная механическая мощность определяется выражением (8).

Нетрудно показать, что формула упругого реактанса имеет вид:

$$\underline{X}_k = -i \frac{k}{\omega}.$$

Реактивная (упруго-деформационная) мощность определяется выражением:

$$Q_d = \frac{F}{X_k} = V^2 X_k.$$

Эта мощность обусловлена способностью упругого тела запасать и возвращать потенциальную энергию упругой деформации. Реактивная (упруго-деформационная) мощность является чисто мнимой величиной. Её знак противоположен знаку реактивной (инерционной) мощности [20, 21].

Полная мощность также вычисляется по формуле (8).

В механической системе, состоящей из пружины и груза, сумма реактансов будет вычисляться следующим образом:

$$\underline{X} = \underline{X}_m + \underline{X}_k = i\omega_0 m - i \frac{k}{\omega_0}.$$

Если она равна нулю, возникает резонанс:

$$i\omega_0 m - i \frac{k}{\omega_0} = 0, \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Активная и реактивная механические мощности, являясь условно «ортогональными», не складываются. Для полной мощности справедлив аналог теоремы Пифагора (точно также, как в электротехнике). Инертный и упругий реактансы характеризуют свойства массивного и упругого тел оказывать сопротивление приводу, заставляющему их совершать колебания [21].

Последние две формулы демонстрируют преимущества использования понятия о механических реактансах и комплексного представления.

В традиционном представлении для получения формулы собственной частоты колебаний маятника требовалось решение дифференциального уравнения второго порядка, тогда как в комплексном виде решение укладывается в одну строчку.

### Механические мощности в векторном представлении

В основе комплексного представления лежит идея вращающихся в комплексной плоскости векторов. Тот же принцип может быть реализован в трехмерном декартовом базисе.

Из (6)–(8) необходимо следует:

$$P = (F, V), Q = [F, V], \\ S^2 = (F, V)^2 + [F, V]^2.$$

Математическая абстракция с проекциями вращающихся векторов имеет конкретную

материальную основу в виде кривошипно-кулисных механизмов.

Возможность одновременного описания гармонических величин с помощью как векторного, так и комплексного представления обусловлена их математической совместимостью. Комплексные величины по существу являются двумерными векторами в комплексной плоскости.

## Заключение

При механических гармонических колебаниях развивается знакоположительная тепловая мощность и знакопеременные реактивные

мощности, характеризующие обратимость кинетической и потенциальной энергий. Полная механическая мощность удовлетворяет формуле Пифагора.

Представление о механических реактивных, активной и полной мощностях является обобщением соответствующих понятий о мощностях из электротехники, что является проявлением электромеханического дуализма [22, 23].

В перспективе возможно представление рассмотренных механических величин с использованием алгебры кватернионов над полем вещественных чисел.

## Список литературы

1. Бурьян Ю.А., Балакин П.Д., Сорокин В.Н. К вопросу о стабилизации амплитуды колебаний механической системы // Омский научный вестник. 2014. № 2 (130). С. 38–44.
2. Загривный Э.А., Иваник В.В. Стабилизация амплитуды колебаний авторезонансного асинхронного электропривода возвратно-вращательного движения динамически уравновешенного бурового снаряда на грунотесущем кабеле // Записки Горного института. 2011. Т. 189. С. 91–94.
3. Шестаков В.М., Белокузов Е.В., Елишкян А.Е. Синтез законов управления режимами работы автоматизированных вибрационных установок // Электричество. 2013. № 11. С. 31–36.
4. Попов И.П. Теория мультиинертного осциллятора // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 3. С. 88–91.
5. Бурьян Ю.А., Сорокин В.Н., Капельюховский А.А. Система управления интенсивностью излучения упругих волн скважинным генератором // Омский научный вестник. 2011. № 1 (97). С. 75–79.
6. Пат. 2624829 Рос. Федерации. Способ управления характеристикой вибрационного поля и устройство для его осуществления / С.В. Елисеев, А.В. Елисеев, А.П. Хоменко и др. № 2015156775: заявл. 28.12.2015; опубл. 07.07.2017, Бюл. № 19. 22 с.
7. Пат. 2624757 Рос. Федерации. Способ управления структурой вибрационного поля вибрационной технологической машины на основе использования эффектов динамического гашения и устройства для его осуществления / С.В. Елисеев, А.В. Елисеев, Е.В. Каимов и др. № 2016102236; заявл. 25.01.2016; опубл. 06.07.2017, Бюл. № 19. 15 с.
8. Управление мехатронными вибрационными установками / Б.Р. Андриевский, И.И. Блехман, Ю.А. Борцов и др. СПб : Наука, 2001. 278 с.
9. Елисеев С.В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных и технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи). Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. 692 с.
10. Елисеев С.В., Артюнин А.И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск : Наука, 2016. 459 с.
11. Васьков М.В., Тульский В.Н. Исследование вопроса компенсации реактивной мощности в электрических сетях «РОССЕТИ ЛЕНЭНЕРГО» // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № S3 (14). С. 28–33.
12. К вопросу повышения эффективности энергосистем и обоснования компенсации реактивной мощности в электрических сетях / М.М. Султанов, А.В. Стрижиченко, И.А. Болдырев и др. // Надежность и безопасность энергетики. 2020. Т. 13. № 4. С. 267–272. DOI: 10.24223/1999-5555-2020-13-4-267-272.
13. Романовский В.В., Бежик А.С. Повышение качества электрической энергии в судовых электроэнергетических системах // Вестн. гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021. Т. 13. № 1. С. 87–101. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-87-101.
14. Едемский С.Н., Пушкаренко И.И., Тригуб О.В. Использование устройства компенсации реактивной мощности СТАТКОМ в электроэнергетической системе // Энергобезопасность и энергосбережение. 2013. № 3. С. 27–30.
15. Догадкин Д.И., Скупов Д., Губардина О. Компенсация реактивной мощности в распределительной сети ПАО "МОЭСК" // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № 6 (39). С. 60–62.
16. Павлов В.Д. Автоматическая компенсация реактивной мощности в электрических сетях // Журнал Сибирского федерально университета. Техника и технологии. 2021. 14(6). С. 684–688. DOI: 10.17516/1999-494X-0342.
17. Павлов В.Д. Перетоки реактивной мощности между фазами // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы : материалы XI Всерос. науч.-практ. конф. Рубцовск, 2021. С. 271–274.
18. Попов И.П. Применение символического (комплексного) метода для расчета сложных механических систем при гармонических воздействиях // Прикладная физика и математика. 2019. № 4. С. 14–24.
19. Павлов В.Д. Математические модели резонансных и антирезонансных процессов // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2021. № 1 (49). С. 17–27. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-1-17-27.

20. Попов И.П. Инертные реактансы вибрационных машин // Вестн. магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. № 4. С. 52 – 55.
21. Попов И.П. «Ортогональные» мощности при механических колебаниях // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. № 6 (338). С. 12–15.
22. Попов И.П. Зависимость реактивного сопротивления пьезоэлектрического преобразователя от механических параметров его нагрузки // Науч.-техн. вестн. информац. технологий, механики и оптики. 2013. № 5 (87). С. 94–98.
23. Павлов В.Д. Энергетика излучения электрического заряда и её следствия // Изв. Уфим. науч. центра РАН. 2021. № 4. С. 5–8. DOI: 10.31040/2222-8349-2021-0-4-5-8.

### References

1. Buryan Yu.A., Balakin P.D., Sorokin V.N. K voprosu o stabilizatsii amplitudy kolebanii mekhanicheskoi sistemy [On the issue of stabilization of the oscillation amplitude of a mechanical system]. *Omskii nauchnyy vestnik* [Omsk scientific bulletin], 2014, no 2 (130), pp. 38–44.
2. Zagrivnyi E.A., Ivanik V.V. Stabilizatsiya amplitudy kolebanii avtorezonansnogo asinkhronnogo elektroprivoda vozvratno-vrashchatel'nogo dvizheniya dinamicheski uravnoveshennogo burovogo snaryada na gruzonesushchem kable [Stabilization of the oscillation amplitude of an autoresonance asynchronous electric drive of a reciprocating rotational motion of a dynamically balanced drill string on a carrying cable]. *Zapiski Gornogo instituta* [The Journal of Mining Institute], 2011, vol. 189, pp. 91–94.
3. Shestakov V.M., Belokuzov E.V., Epishkin A.E. Sintez zakonov upravleniya rezhimami raboty avtomatizirovannykh vibratsionnykh ustankov [Synthesis of laws governing the operation modes of automated vibration systems]. Elektrichestvo Publ., 2013, No. 11, pp. 31–36.
4. Popov I.P. Teoriya multinertnogo ostsilyatora [Theory of a multi-inert oscillator]. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii* [Problems of mechanical engineering and automation], 2020, no 3, pp. 88–91.
5. Buryan Yu.A., Sorokin V.N., Kapelyukhovskii A.A. Sistema upravleniya intensivnostyu izlucheniya uprugikh voln skvazhinnym generatorom [The system of controlling the radiation intensity of elastic waves by the downhole generator]. *Omskii nauchnyy vestnik* [Omsk scientific bulletin], 2011, no 1 (97), pp. 75–79.
6. Eliseev S.V., Eliseev A.V., Khomenko A.P., Artyunin A.I., Pnev A.G., Kashuba V.B. Patent RU 2624829 C1, 07.07.2017.
7. Eliseev S.V., Eliseev A.V., Kaimov E.V., Nguen D.H., Vyong K.Ch. Patent RU 2624757 C1, 06.07.2017.
8. Andrievskii B.R., Blekhman I.I., Bortsov Yu.A., Gavrilov S.V., Konoplev V.A., Lavrov B.P., Polyakhov N.D., Tomchin O.P., Fradkov A.L., Shestakov V.M. Upravlenie mekhatronnymi vibratsionnymi ustankovkami [Control of mechatronic vibration units]. Saint-Petersburg: Nauka Publ., 2001, 278 p.
9. Eliseev S.V. Prikladnoi sistemnyi analiz i strukturnoe matematicheskoe modelirovanie (dinamika transportnykh i tekhnologicheskikh mashin: svyaznost' dvizhenii, vibratsionnye vzaimodeistviya, rychazhnye svyazi) [Applied system analysis and structural mathematical modeling (dynamics of transport and technological machines: connectivity of motions, vibrational interactions, lever linkages)]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018, 692 p.
10. Eliseev S.V., Artyunin A.I. Prikladnaya teoriya kolebanii v zadachakh dinamiki lineinykh mekhanicheskikh sistem [Applied theory of oscillations in problems of the dynamics of linear mechanical systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2016, 459 p.
11. Vas'kov M.V., Tul'skii V.N. Issledovaniye voprosa kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v elektricheskikh setyakh "ROSSETI LENENERGO" [Investigation of the issue of compensation of reactive power in electrical networks "ROSSETI LENENERGO"]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye* [Electricity. Transmission and distribution], 2019, no S3 (14), pp. 28–33.
12. Sultanov M.M., Strizhichenko A.V., Boldyrev I.A., Zhelyaskova O.I., Voloshin Ye.A., Rogozinnikov Ye.I. K voprosu povysheniya effektivnosti energosistem i obosnovaniyu kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v elektricheskikh setyakh [On the issue of increasing the efficiency of power systems and justifying the compensation of reactive power in electrical networks]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* [Reliability and Safety of Energy], 2020, vol. 13, no 4, pp. 267–272. DOI: 10.24223/1999-5555-2020-13-4-267-272.
13. Romanovskii V.V., Bezhik A.S. Povysheniye kachestva elektricheskoi energii v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh [Improving the quality of electrical energy in ship power systems]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* [Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov], 2021, V. 13, No. 1, pp. 87–101. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-87-101.
14. Yedemskii S.N., Pushkarenko I.I., Trigub O.V. Ispol'zovaniye ustroystva kompensatsii reaktivnoy moshchnosti STAT-KOM v elektroenergeticheskoy sisteme [Using the STATCOM reactive power compensation device in the electric power system]. *Energobezopasnost' i energosberezheniye* [Energy security and energy saving], 2013, no 3, pp. 27–30.
15. Dogadkin D.I., Skupov D., Gubardina O. Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v raspredelitel'noy seti PAO «MOESK» [Compensation of reactive power in the distribution network of PJSC «MOESK»]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye* [Electricity. Transmission and distribution], 2016, no 6 (39), pp. 60–62.
16. Pavlov V.D. Avtokompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh [Auto-compensation of reactive power in electrical networks]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universitetata. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of the Siberian Federal University. Technics and technology], 2021, 14(6), C. 684–688. DOI: 10.17516/1999-494X-0342.
17. Pavlov V.D. Peretoki reaktivnoi moshchnosti mezhdu fazami [Reactive power flows between phases]. *Materialy XI Vse-rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoyaniye i perspektivy»* [Proceedings of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference «Modern equipment and technologies: problems, state and perspectives»], Rubtsovsk, 2021, pp. 271–274.

18. Popov I.P. Primenenie simvolicheskogo (kompleksnogo) metoda dlya rascheta slozhnykh mekhanicheskikh sistem pri garmonicheskikh vozdeistviyakh [Application of the symbolic (complex) method for calculating complex mechanical systems under harmonic influences]. *Prikladnaya fizika i matematika* [Applied Physics and Mathematics], 2019, no 4, pp. 14 – 24.
19. Pavlov V.D. Matematicheskiye modeli rezonansnykh i antirezonansnykh protsessov [Mathematical models of resonant and antiresonant processes]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2021, № 1(49), pp. 17–27. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-1-17-27.
20. Popov I.P. Inertnye reaktansy vibratsionnykh mashin [Inert reactants of vibrating machines]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov], 2019, vol. 17, no 4, pp. 52 – 55.
21. Popov I.P. «Ortogonal'nye» moshchnosti pri mekhanicheskikh kolebaniyakh [«Orthogonal» power at mechanical vibrations]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and applied problems of technic and technology], 2019, no 6 (338), pp. 12 – 15.
22. Popov I.P. Zavisimost' reaktivnogo soprotivleniya p'yezoelektricheskogo preobrazovatelya ot mekhanicheskikh parametrov ego nagruzki [Dependence of the reactance of a piezoelectric transducer on the mechanical parameters of its load]. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mehaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics], 2013, no 5 (87), pp. 94–98.
23. Pavlov V.D. Energetika izlucheniya elektricheskogo zaryada i ee sledstviya [Energetics of radiation of an electric charge and its consequences]. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2021, no 4, C. 5–8. 10.31040/2222-8349-2021-0-4-5-8.

### Информация об авторе

**Павлов Валентин Дмитриевич**, канд. техн. наук, начальник научно-информационного отдела, Владимирский электромеханический завод, г. Владимир, e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

### Information about the authors

**Valentin D. Pavlov**, Ph.D. in Engineering Science, Head of the Science and Information Department, Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

# Системные подходы в обобщенной оценке динамических особенностей вибрационных взаимодействий элементов технических объектов транспортного и технологического назначения в условиях связных силовых нагрузений

А. В. Елисеев, Р. С. Большаков✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российской Федерации

✉ bolshakov\_rs@mail.ru

## Резюме

На сегодняшний день активно развивается методология структурного математического моделирования для решения задач динамики технических объектов транспортного и технологического назначения, находящихся в условиях вибрационного нагружения, связанного с воздействиями силовой природы. Цель исследования заключается в разработке методологической базы для оценки и контроля совокупности динамических особенностей механической колебательной системы с учетом коэффициента связности внешних силовых возмущений, рассматриваемого в качестве варьируемого настроичного параметра. В рамках методологии структурного математического моделирования механической колебательной системы, используемой в качестве расчетной схемы технического объекта, сопоставляется структурная схема эквивалентной системы автоматического управления. Для построения оценок динамических особенностей используются методы теории автоматического управления, интегральных преобразований Лапласа, теории графов. На примере механической колебательной системы с двумя степенями свободы разработан подход к оценке совокупности обобщенных динамических особенностей, представленных состояниями и формами взаимодействий, в виде ориентированных графов, рассматриваемых в качестве своеобразных инвариантов, сохраняющихся на определенных частотных интервалах внешних силовых возмущений. В статье показано, что коэффициент связности внешних возмущений, который рассматривается в качестве варьируемого параметра системы, обладает потенциалом влияния на существенные свойства механической колебательной системы, в интегральном отношении выражаемые количеством особенностей в виде резонансов и состояний обнуления амплитуд колебания координат объекта, динамическое состояние которого оценивается.

## Ключевые слова

механическая колебательная система, структурное математическое моделирование, внешние связные воздействия, коэффициент связности, частотная функция обнуления, динамическое гашение колебаний, динамические состояния, динамические формы взаимодействий

## Для цитирования

Елисеев А. В. Системные подходы в обобщенной оценке динамических особенностей вибрационных взаимодействий элементов технических объектов транспортного и технологического назначения в условиях связных силовых нагрузений / А.В. Елисеев, Р.С. Большаков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 39–52. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).39-52

## Информация о статье

поступила в редакцию: 24.01.2022 г.; поступила после рецензирования: 01.02.2022 г.; принята к публикации: 04.02.2022 г.

# System approach in a generalized assessment of the vibrational interactions' dynamic features of the elements of transport and technological objects under coherent force loadings

А. В. Eliseev, R. S. Bolshakov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ bolshakov\_rs@mail.ru

## Abstract

The methodology of structural mathematical modeling is being developed to solve the problems of the dynamics of technical objects under vibration loading by coherent effects of a force nature. The purpose of the study is to develop a methodological framework for assessing and controlling the set of dynamic features of a mechanical oscillatory system, taking into account the coefficient of connectivity of external force disturbances, viewed as a variable tuning parameter. Within the framework of the methodology of structural mathematical modeling of a mechanical oscillatory system used as a design scheme of a technical object, it is compared with a structural diagram of a dynamically equivalent automatic control system. To build estimates of dynamic features, methods of automatic control theory, Laplace integral transformations, and graph theory are used. Using the example

of a mechanical oscillatory system with two degrees of freedom, an approach has been developed to assess the totality of generalized dynamic features represented by states and modes of interactions in the form of oriented graphs viewed as peculiar invariants persisting at certain frequency intervals of external force disturbances. It is shown that connectivity coefficient of external perturbations, considered as a variable parameter of the system, has the potential to influence the significant dynamic properties of a mechanical oscillatory system, which are integrally expressed by the number of dynamic features in the form of dynamic interaction modes, resonances and states of zeroing the oscillation amplitudes of object coordinates whose dynamic condition is to be evaluated.

### Keywords

mechanical oscillation system, structural mathematical modeling, external connecting disturbances, connectivity coefficient, frequency function of zeroing, dynamical absorption of oscillations, dynamical conditions, dynamical forms of interactions

### For citation

Eliseev A.V., Bolshakov R.S. Sistemnye podkhody v obobschennoy otsenke dinamicheskikh osobennostey vibratsionnykh vzaimodeistvii elementov tekhnicheskikh ob"ektov transportnogo i tekhnologicheskogo naznacheniya v usloviyakh svyaznykh silovykh nagruzhenii [System approach in a generalized assessment of the vibrational interactions' dynamic features of the elements of transport and technological objects under coherent force loadings]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2022, No. 1 (73), pp. 39–52. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).39-52

### Article Info

Received: 24.01.2022; revised: 01.02.2022; accepted: 04.02.2022.

### Введение

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам безопасности функционирования сложных технических систем [1–3]. В рамках задач обеспечения безопасности технических систем существенное значение приобретают технологии оценки, контроля и формирования режимов движения, способные обеспечивать требуемый уровень динамического качества взаимодействия элементов технических объектов, находящихся в условиях вибрационных взаимодействий [4–6]. В ряде задач динамики для оценки свойств технических объектов, представленных расчетными схемами в виде линейных механических колебательных систем, заметное распространение получили методы структурного математического моделирования [7–10]. В рамках структурных подходов математического моделирования механической колебательной системе, используемой в качестве расчетной схемы, сопоставляется структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления.

Методы структурного математического моделирования получили развитие в решении задачи виброзащиты и виброизоляции [11, 12], задач динамики с дополнительными связями [13], динамики сочленений [14], вибрационных взаимодействий элементов технологических машин с учетом неудерживающего характера связей [15, 16].

В последнее время методы структурного математического моделирования своё даль-

нейшее развитие получили в направлении оценки динамических состояний и динамических форм взаимодействий элементов механических колебательных систем, находящихся под воздействием зависимых между собой возмущений силовой природы [17–19]. Характер зависимости силовых воздействий определяется так называемым коэффициентом связности, представляющим собой отношение амплитуд колебаний внешних возмущений. В частности, для нулевого параметра связности воздействие со стороны зависимых силовых возмущений сводится к одной внешней силе, приложенной к массоинерционному элементу. Совокупность особенностей движения элементов механической колебательной системы для нулевого коэффициента связности представляет собой распределение резонансов, режимов динамического гашения и множеств форм движений, которые могут быть охарактеризованы взаимной направленностью изменения координаты массоинерционного элемента и внешнего силового возмущения.

Вопросы влияния коэффициента связности внешних возмущений на совокупность динамических особенностей механических колебательных систем недостаточно детализированы в плане разработки рациональных подходов к оценке совокупности обобщенных динамических свойств.

Статья посвящена разработке метода оценки совокупности динамических особенностей в виде динамических состояний и динамических форм взаимодействий элементов меха-

нических колебательных систем, с учетом коэффициента связности внешних воздействий, рассматриваемого в качестве варьируемого настроичного параметра.

### Основные положения. Постановка задач

Рассматривается механическая колебательная система, образованная массоинерционными элементами  $m_1$ ,  $m_2$  и упругими элементами  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , соединяющими массоинерционные элементы между собой и с опорными поверхностями (рис.1).

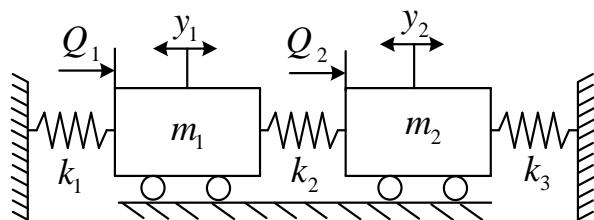


Рис.1. Расчетная схема механической колебательной системы

Fig. 1. Design scheme of mechanical oscillatory system

К массоинерционным элементам приложены внешние гармонические синфазные силовые возмущения  $Q_1$  и  $Q_2$ . Предполагается, что амплитуды возмущений находятся в зависимости вида

$$Q_2 = \gamma Q_1 \quad (1)$$

где  $\gamma$  — коэффициент связности.

Коэффициент связности (1) внешних возмущений может быть интерпретирован как настроичный параметр механической колебательной системы, позволяющий производить регулировку динамических особенностей. Для фиксированного коэффициента связности предполагается, что под действием внешних сил массоинерционные элементы совершают вынужденные установившиеся синфазные колебания на частоте внешнего возмущения. В

общем случае, частота внешнего возмущения может принимать произвольные значения. Для фиксированной частоты внешнего возмущения движение массоинерционного элемента, выбранного в качестве объекта, динамическое состояние которого оценивается, может быть охарактеризовано, либо критическими состояниями, либо знакопределеными формами динамического взаимодействия. Под критическими состояниями понимаются состояния обнуления амплитуды колебания объекта или резонанс. Динамические формы взаимодействий проявляются положительными, если изменения координаты движения элемента совпадают с изменениями силового возмущения или отрицательными, если изменения координаты движения элемента противоположны изменениям силового возмущения.

С обобщенной точки зрения, совокупность движений, вызванных внешними возмущениями, представляет собой множество критических состояний и динамических форм взаимодействий объекта, являющееся динамической особенностью силового воздействия на систему с учетом фиксированного коэффициента связности.

Задача заключается в разработке метода оценки динамических особенностей системы в виде совокупности критических состояний и динамических форм взаимодействий в зависимости от коэффициента связности внешних возмущений.

### Математическая модель

На основе известных методов [9] механической колебательной системе (см. рис.1) может быть сопоставлена структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления (рис.2) приемами операционного исчисления [20].

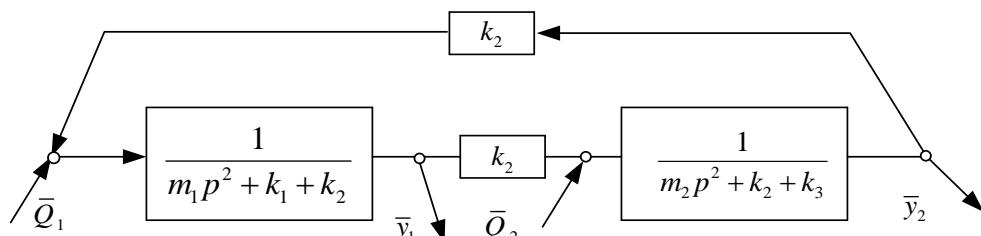


Рис.2. Структурная схема механической колебательной системы (рис.1) ( $p=j\omega$ ,  $j=\sqrt{-1}$ ,  $\leftrightarrow$  над символом обозначает преобразование Лапласа)

Fig. 2. Structural scheme of mechanical oscillatory system (fig.1) ( $p = j\omega$ ,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\leftrightarrow$  above the symbol designates the Laplace transformation)

Пусть массоинерционный элемент  $m_1$  рассматривается в качестве объекта, динамическое состояние которого оценивается. Для определения динамических свойств объекта на основе структурной схемы (см. рис.2) может быть построено передаточное отношение:

$$W_{11}(\gamma, p) = \frac{\bar{y}_1}{Q_1} = \frac{m_2 p^2 + k_2 + k_3 + \gamma k_2}{A(p)}, \quad (2)$$

где  $Q_1$  рассматривается как входной сигнал, а  $y_1$  – как выходной.

Соответствующая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), полученная на основе передаточного отношения (2) путем замены переменных  $p=j\omega$ , принимает вид:

$$A_{11}(\omega) = W_{11}(\gamma, p) \Big|_{p=j\omega} = \frac{-m_2(\omega^2 - (n_2^2 + \gamma\Delta_2^2))}{m_1 m_2 (\omega^2 - \omega_1^2) \cdot (\omega^2 - \omega_2^2)} \quad (3)$$

$$n_1^2 = \frac{k_1 + k_2}{m_1},$$

$$n_2^2 = \frac{k_1 + k_2}{m_1},$$

$$\Delta_1^2 = \frac{k_2}{m_1},$$

$$\Delta_2^2 = \frac{k_2}{m_2},$$

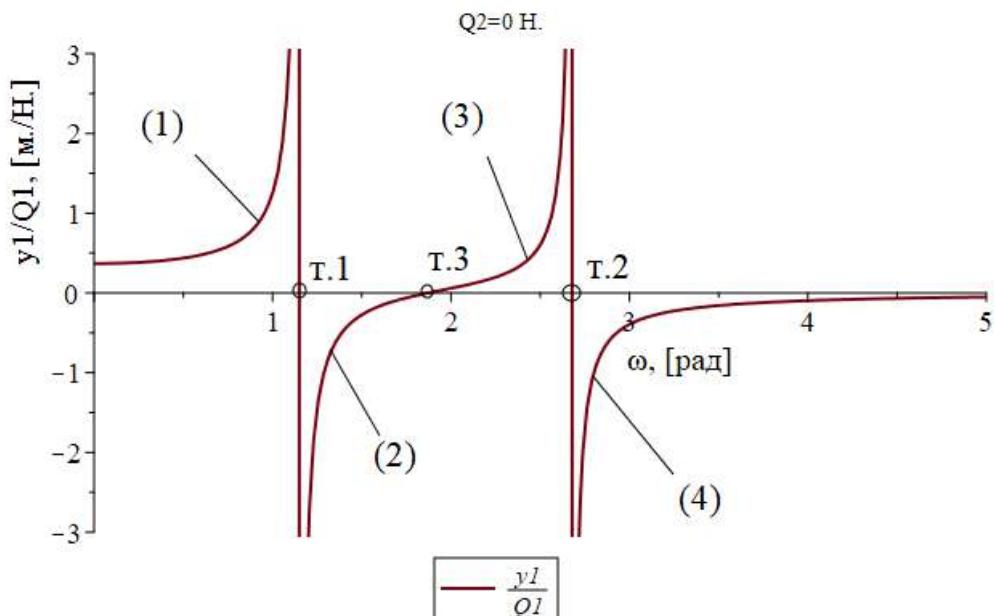
$$\omega_1^2 = \frac{n_1^2 + n_2^2}{2} - \sqrt{\left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{2}\right)^2 + \Delta_1^2 \Delta_2^2},$$

$$\omega_2^2 = \frac{n_1^2 + n_2^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{2}\right)^2 + \Delta_1^2 \Delta_2^2}.$$

Если коэффициент связности внешних возмущений  $\gamma = 0$ , то силовое возмущение приложено только к массоинерционному элементу  $m_1$ . В таком случае динамические свойства механической колебательной системы отображаются следующим графиком АЧХ (рис.3).

Динамические особенности, определяемые АЧХ, могут быть отображены в виде графов динамических состояний и форм динамических взаимодействий объекта механической колебательной системы.

1. Совокупность критических состояний обнуления амплитуды колебаний объекта и состояний резонанса отображаются вершинами графа, а знакопределенные ветви графика АЧХ, соответствующие «положительным» и «отрицательным» формам динамических взаимодействий объекта системы, отображаются «положи-



**Рис.3.** Амплитудно-частотная характеристика для  $\gamma = 0$ : 1, 3 – положительные ветви графика, 2, 4 – отрицательные ветви графика, т.1 – первая собственная частота  $\omega_1$ , т.2 – вторая собственная частота  $\omega_2$ , т.3 – частота динамического гашения колебаний  $\omega_0$

**Fig. 3.** Frequency response characteristic for  $\gamma = 0$ : 1,2 – positive branches of the graph, 2,4 – negative branches of the graph, point 1 – first natural frequency  $\omega_1$ , point 2 – second natural frequency  $\omega_2$ , point 3 – frequency of dynamic oscillation damping  $\omega_0$

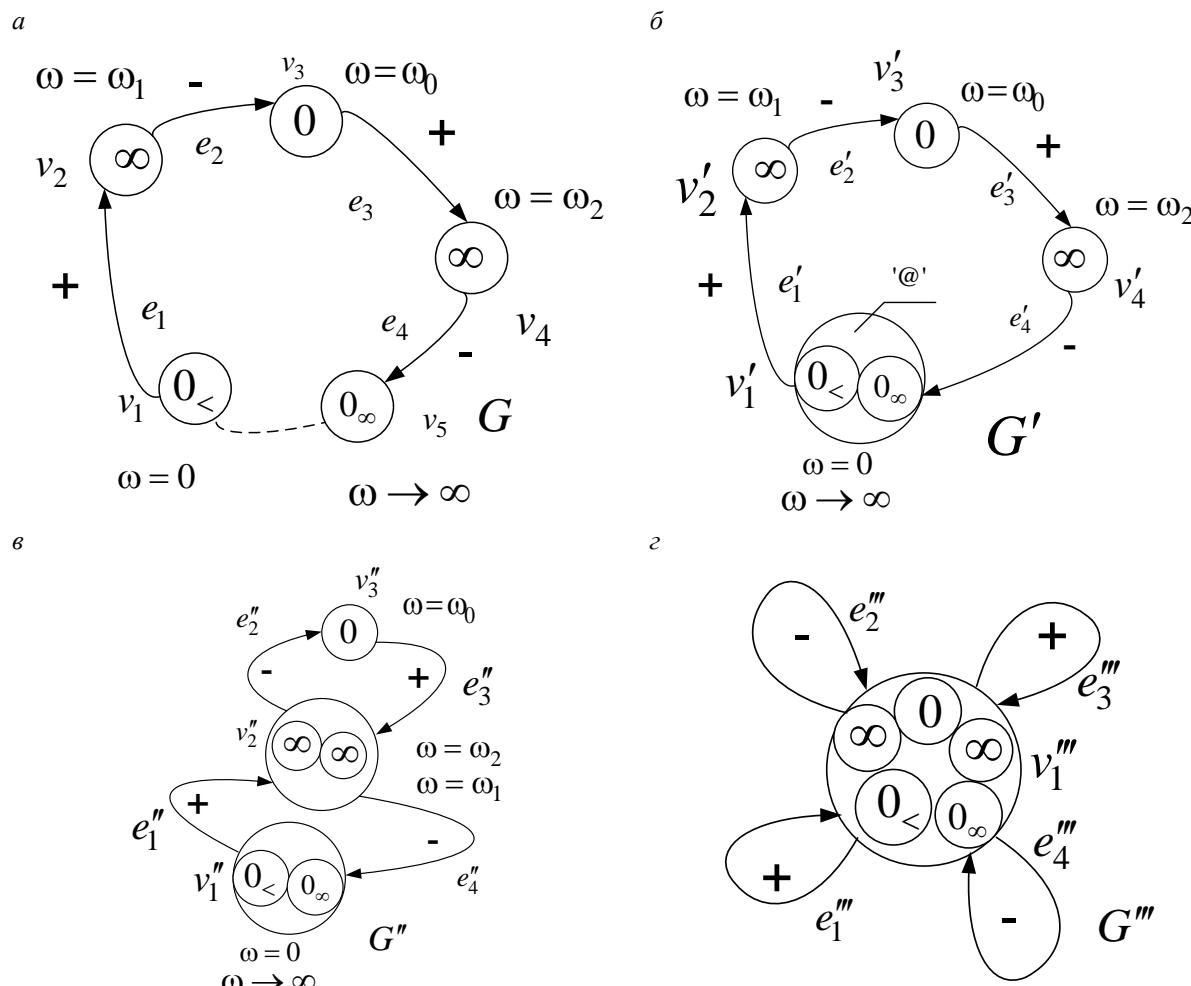
тельными» и «отрицательными» дугами.

Наравне с резонансами и состоянием обнуления вводится условное состояние «покоя», в котором система находится «до приложения к ней внешнего силового возмущения». Так же вводится условное состояние «запирания», которое отображает обнуление амплитуды колебаний объекта по мере неограниченного возрастания частоты внешнего возмущения.

С учетом условных динамических состояний АЧХ сопоставляется граф динамических состояний объекта механической колебательной системы как конечное множество вершин, последовательно соединенных ориентированным в направлении возрастания частоты дугами.

Граф динамических состояний может быть преобразован на основе критерия отож-

дествления между собой вершин условных динамических состояний. Результирующий граф образован множеством вершин, отображающих состояния обнуления или резонанса, и дополнительной вершиной, отображающей условные динамические состояния «покоя» и запирания». В свою очередь, критерий отождествления вершин может отображать существенные признаки, учитывающие специфику задачи. В частности, могут быть использованы критерии отождествления резонансов на различных частотах. В этом случае все вершины, отображающие резонансы, преобразуются в одну вершину. Так же может быть использован обобщенный критерий отождествления между собой всех динамических состояний. В результате может быть получен граф, образованный од-



**Рис. 4.** Графы динамических состояний: *а* – граф  $G = \{V, E\}$  «последовательных» состояний; *б* – граф  $G' = \{V', E'\}$  с отождествленными, «условными» состояниями; *в* – граф  $G'' = \{V'', E''\}$  отождествленными резонансами; *г* – граф  $G''' = \{V''', E'''\}$  «обобщенного» состояния

**Fig. 4.** Dynamic state graphs: *a* – graph  $G = \{V, E\}$  of «successive» states; *b* – graph  $G' = \{V', E'\}$  with identified, «conditional» state; *c* – graph  $G'' = \{V'', E''\}$  with identified resonances; *d* – graph  $G''' = \{V''', E'''\}$  of «generalized» state

ной вершиной и совокупностью петель, отображающих положительные и отрицательные формы динамических взаимодействий.

Для коэффициента связности  $\gamma = 0$  динамические состояния, представленные АЧХ (см. рис.3), отображены графом  $G = \{V, E\}$ , где  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$  – множество вершин,  $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$  – множество дуг (рис.4а). Состояние динамического гашения на частоте  $\omega = \omega_0$  (см. рис.3, т.3) отображено вершиной  $v_3 = \{0\}$ . Состояния резонанса на частотах  $\omega = \omega_1$  и  $\omega = \omega_2$  (см. рис.3, т.1, т.2) отображено вершинами  $v_2 = \{\infty\}$  и  $v_4 = \{\infty\}$  соответственно.

Наравне с состояниями резонанса и обнуления амплитуды колебания (или состояния динамического гашения колебаний) введено два условных динамических состояния для того, чтобы существующие формы динамических взаимодействий всегда находились «между» определенными динамическими состояниями. Условное динамическое состояние «покоя», в котором находится система до приложения внешнего воздействия, отображено вершиной  $v_1 = \{0\}$ . Условное динамическое состояние «запирания», в котором система находится при неограниченном возрастании частоты внешнего возмущения  $\omega \rightarrow \infty$ , обозначено вершиной  $v_5 = \{0_\infty\}$ . Можно полагать, что в условных динамических состояниях амплитуды колебания координаты объекта равна нулю. «Положительные» формы динамических взаимодействий элемента  $y_1$ , определяемые положительными ветвями АЧХ на частотных интервалах  $(0, \omega_1)$  и  $(\omega_0, \omega_2)$  (см. рис.3, линии 1,3), отображены «положительными» дугами  $e_1 = \langle(v_1, v_2), +\rangle$ ,  $e_3 = \langle(v_3, v_4), +\rangle$  соответственно. «Отрицательные» формы динамических взаимодействий, определяемые отрицательными ветвями АЧХ на частотных интервалах  $(\omega_1, \omega_0)$  и  $(\omega_2, \infty)$  (см. рис.3, линии 2,4), отображены отрицательными дугами  $e_2 = \langle(v_2, v_3), -\rangle$ ,  $e_4 = \langle(v_4, v_5), -\rangle$  соответственно.

В свою очередь, граф  $G$  на основе использования критерия отождествления между собой вершин условных динамических состояний может быть преобразован к графу  $G' = \{V', E'\}$ , где множество состояний представлено вершинами  $V' = \{v'_1, v'_2, v'_3, v'_4\}$ , а множество форм динамических взаимодействий дугами  $E' = \{e'_1, e'_2, e'_3\}$ . Вершины  $v'_2, v'_3, v'_4$  обозначают те же динамические состояния, что и вершины  $v_2, v_3, v_4$  графа  $G$ , а вершина  $v'_1 = \{@\}$  отобража-

ет, отождествленные между собой, условные состояния «покоя» и «запирания». Дуги  $e'_1 = \langle(v'_1, v'_2), +\rangle$ ,  $e'_3 = \langle(v'_3, v'_1), +\rangle$  отображают положительные формы взаимодействий элемента  $y_1$ , а дуги  $e'_2 = \langle(v'_2, v'_3), -\rangle$ ,  $e'_4 = \langle(v'_4, v'_1), -\rangle$  – отрицательные.

Применение к графу  $G'$  критерия отождествления между собой режимов резонанса приводит к графу  $G'' = \{V'', E''\}$ . Граф  $G'' = \{V'', E''\}$  образован вершинами  $V'' = \{v''_1, v''_2, v''_3\}$  и дугами  $E'' = \{v''_1, v''_2, v''_3, v''_4\}$ .

Для определения обобщенных динамических особенностей механической колебательной системы используется критерий, отождествляющий между собой состояния резонансов, состояния «обнуления» координат и условных состояний (рис.6г). Применение обобщенного критерия приводит к графу  $G''' = \{V''', E'''\}$ , который образован одной вершиной и набором петель  $E''' = \{e'''_1, e'''_2, e'''_3, e'''_4\}$ , где  $e'''_1, e'''_3$  отображают «положительные» формы, а  $e'''_2, e'''_4$  – «отрицательные».

Таким образом, в обобщенном смысле совокупность динамических состояний для нулевого коэффициента связности может быть охарактеризована наличием двух положительных и двух отрицательных форм динамических взаимодействий в виде выражения  $F_2^2$ , где нижний индекс означает количество отрицательных форм взаимодействий, а верхний – число положительных.

2. Наравне с семейством графов динамических состояний может быть определено семейство графов динамических форм взаимодействий объекта механической колебательной системы. Для построения графа динамических форм взаимодействий на основе АЧХ каждой положительной ветви графика, обозначающей множество положительных форм динамических взаимодействий элемента, сопоставляется «положительная» вершина; каждой отрицательной ветви графика, обозначающей множество «отрицательных» форм динамических взаимодействий объекта системы сопоставляется «отрицательная» вершина.

Критические состояния механической колебательной системы, представленные на АЧХ точками обнуления или разрывами второго рода, являющимися граничными точками частотных интервалов, в которых определены положительные или отрицательные ветви, отображаются направленными дугами, соеди-

няющими вершины графа. Совокупность условных динамических состояний отображается дополнительной направленной дугой, соединяющей формы динамических взаимодействий, соответствующих частотным интервалам, граничащим с нулем и бесконечностью.

Граф динамических форм взаимодействий может быть преобразован в граф на основе критерия отождествления форм динамических взаимодействий одинаковой направленности. В этом случае, вершины, сопоставленные «положительным» формам взаимодействий, отображаются одной «положительной» вершиной, а вершины, сопоставленные «отрицательным» формам взаимодействий, отображаются одной «отрицательной» вершиной.

Возможно использование обобщенного критерия отождествления форм одинаковых и противоположных направленностей. В результате получается граф, состоящий из одной вершины и множества петель, отображающих совокупность динамических состояний.

Для коэффициента связности  $\gamma = 0$  совокупность динамических форм взаимодействий объекта на основе амплитудно-частотной характеристики (см. рис. 3) отображается графом  $G = \{V, E\}$  (см. рис. 5, a). Множество вершин  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$  отображает множество динамических форм взаимодействий, а множество дуг  $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$  отображает динамические состояния. «Положительные» вершины  $v_1 = \{+, (0, \omega_1)\}$ ,  $v_3 = \{+, (\omega_0, \omega_2)\}$  отображают «положительные» формы динамических взаимодействий на частотных интервалах  $(0, \omega_1)$  и  $(\omega_0, \omega_2)$ , представленные положительными ветвями

графика АЧХ (см. рис. 3, 1, 3); «отрицательные» вершины  $v_2 = \{-, (\omega_1, \omega_0)\}$ ,  $v_4 = \{-(\omega_2, \infty)\}$  отображают «отрицательные» формы динамических взаимодействий на частотных интервалах  $(\omega_1, \omega_0)$  и  $(\omega_2, \infty)$ , представленные отрицательными ветвями графика амплитудно-частотной характеристики (см. рис. 3, 2, 4). Дуги  $e_1 = \langle(v_1, v_2), \infty; \omega = \omega_1 \rangle$ ,  $e_3 = \langle(v_3, v_4), \infty; \omega = \omega_2 \rangle$  отображают состояния резонанса на собственных частотах  $\omega = \omega_1$ ,  $\omega = \omega_2$  (см. рис. 3). Дуга  $e_2 = \langle(v_2, v_3), 0; \omega = \omega_0 \rangle$  отображает состояние динамического гашения колебаний на частоте  $\omega = \omega_0$ , дуга  $e_4 = \langle(v_4, v_1), @; \omega = 0, \infty \rangle$  отображает обобщение условных состояний «покоя» и «запирания».

На основе использования критерия отождествления между собой динамических форм взаимодействий с одинаковыми направленностями движений без привязки к частотным интервалам граф  $G$  преобразован к графу  $G' = \{V', E'\}$ , где  $V' = \{V'_1, V'_2\}$  – множество вершин,  $E' = \{e'_1, e'_2, e'_3, e'_4\}$  – множество дуг (см. рис. 5 б). Результирующий граф  $G'$  образован обобщенной вершиной  $V'_1 = \{--\}$ , отображающей «положительные» формы взаимодействий, обобщенной вершиной  $V'_2 = \{++\}$ , отображающей отрицательные формы динамических взаимодействий, дугами  $e'_1 = \langle V'_2, V'_1 \rangle$ ,  $e'_3 = \langle V'_2, V'_1 \rangle$  отображающими режимы резонанса, дугой  $e'_2 = \langle V'_1, V'_2 \rangle$ , отображающей режим обнуления амплитуды колебаний, и дугой  $e'_4 = \langle V'_1, V'_2 \rangle$ , отображающей условный режим «покоя – запирания».

Для передачи представлений о динамических формах без учета их направленностей ис-

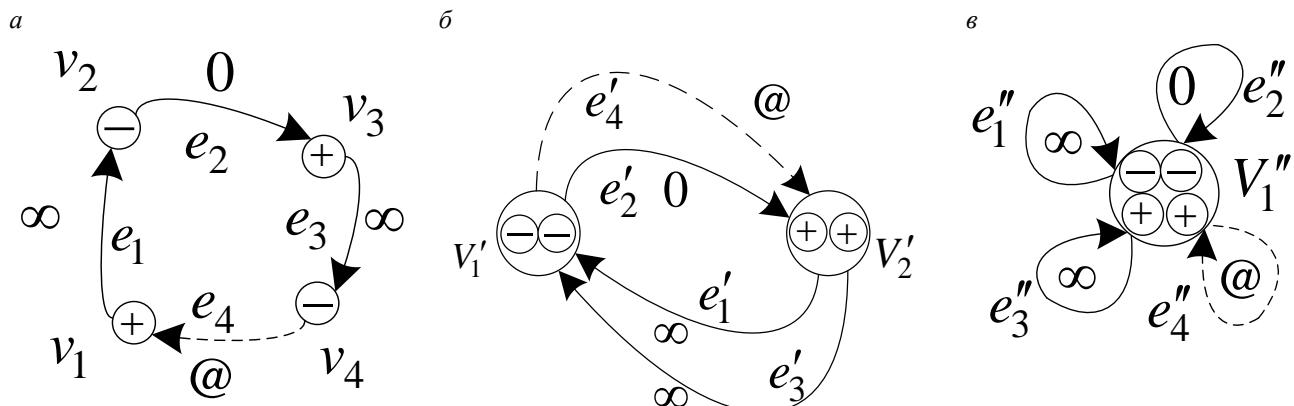


Рис. 5. Динамические формы взаимодействий объекта в виде ориентированных графов: а – граф  $G = \{V, E\}$ ; б – граф  $G' = \{V', E'\}$ ; в – граф  $G'' = \{V'', E''\}$

Fig. 5. Dynamic interaction modes of the object in the form of oriented graphs: a – graph  $G = \{V, E\}$ ; б – graph  $G' = \{V', E'\}$ ; в – graph  $G'' = \{V'', E''\}$

пользуется обобщенный критерий отождествления между собой положительных и отрицательных форм. Применение критерия преобразует граф  $G'$  к виду  $G'' = \{V'', E''\}$  (рис. 6, в). Результатирующий граф  $G''$  образован одной обобщенной вершиной и набором петель, отображающих два резонанса, один режим динамического гашения колебаний и условный режим «покоя – запирания».

С обобщенной точки зрения динамические формы взаимодействий для нулевого коэффициента связности характеризуются двумя резонансами и одним режимом динамического гашения колебаний, что может быть рассмотрено в качестве инварианта  $S_1^2$ , где нижний индекс означает количество состояний обнуления амплитуд колебания, а верхний – количество резонансов.

### Метод построения динамических инвариантов на основе частотной функции обнуления

Совокупность динамических состояний объекта механической колебательной системы (см. рис.1) в зависимости от  $\gamma$  коэффициента связности силовых возмущений  $Q_1, Q_2$  может быть построена на основе амплитудно-частотной характеристики (3) передаточного отношения (2) структурной схемы, отображающей силовое воздействие на объект в качестве входного сигнала, а колебание объекта – в качестве выходного (см. рис.2).

Для фиксированного коэффициента связности внешних воздействий, амплитудно-частотная характеристика (3) позволяет определить конечную совокупность форм динамических состояний. Каждому значению коэффициента связности составляется совокупность интервалов знакопостоянства амплитудно-частотной характеристики, критических значений частот обнуления и частот резонанса, которая может быть отображена графиками динамических особенностей. Частотные интервалы знакопостоянства амплитудно-частотной характеристики с учетом коэффициента связности могут быть определены на основе частотной функции аргумента коэффициента связности, обнуляющей числитель соответствующего дробно-рационального выражения (3):

$$\omega_0^2 = n_2^2 + \gamma \Delta_2^2.$$

Частотная функция обнуления  $\omega_0^2$  амплитуды колебания объекта, динамическое состояние которого оценивается, определяет критиче-

ские значения коэффициента связности, в которых частотная функция принимает нулевое значение и совпадает с частотами собственных колебаний (рис. 6):

$$\gamma_{10} = \frac{-n_2^2}{\Delta_2^2},$$

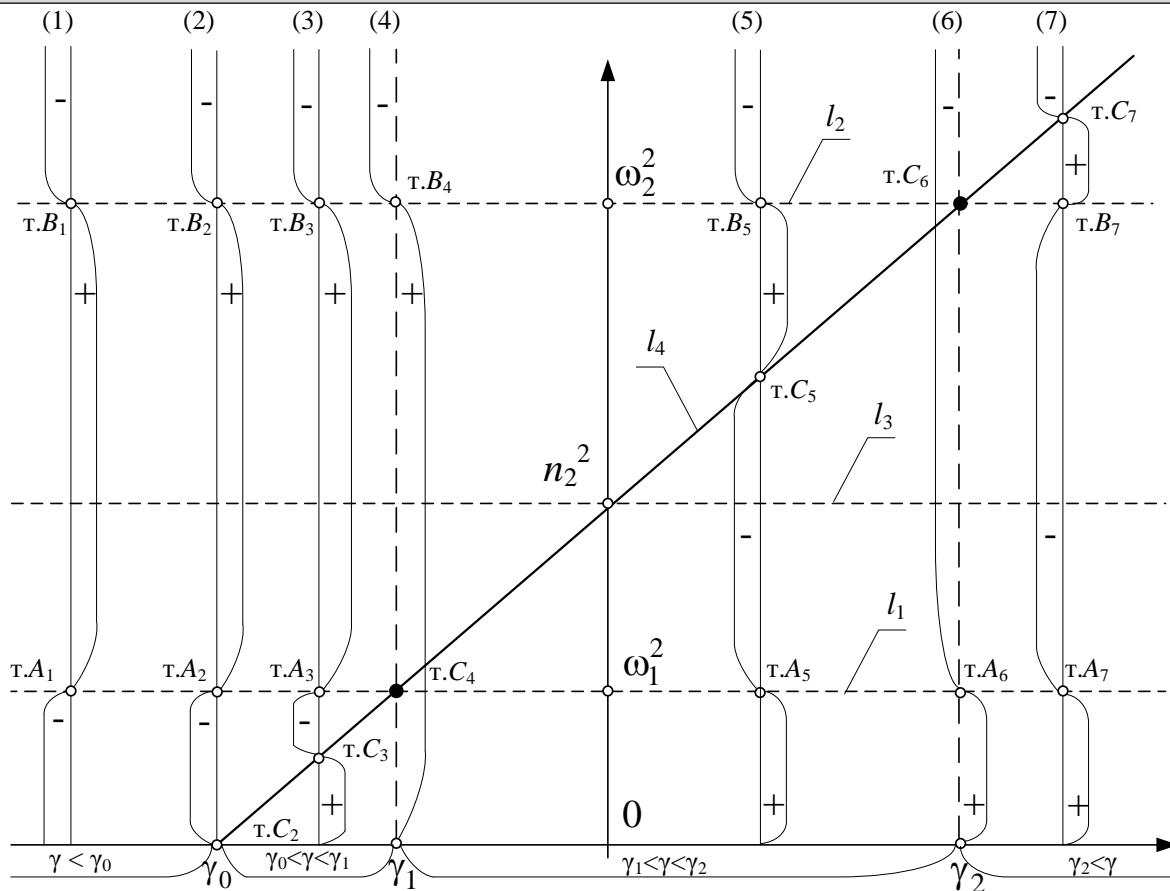
$$\gamma_{11} = \frac{\omega_1^2 - n_2^2}{\Delta_2^2},$$

$$\gamma_{12} = \frac{\omega_2^2 - n_2^2}{\Delta_2^2}.$$

Критические значения коэффициента связности определяют разбиение области  $(-\infty, \infty)$  всевозможных значений коэффициента связности на непересекающиеся множества  $(-\infty, \gamma_0), \{\gamma_0\}, (\gamma_0, \gamma_1), \{\gamma_1\}, (\gamma_1, \gamma_2), \{\gamma_2\}, (\gamma_2, \infty)$ , в каждом из которых амплитудно-частотная характеристика может быть представлена графиками динамических особенностей (рис. 6).

В общем случае, частотная функция обнуления может быть использована для отображения совокупностей динамических состояний и форм динамических взаимодействий с учетом критерии отождествления ряда признаков динамических характеристик, отображающих существенные свойства решения задачи.

1. Совокупность динамических состояний объекта механической колебательной системы в зависимости от «знакоопределяющих» множеств (табл.3, стр. I) коэффициента связности внешних воздействий может быть отображена на основе частотной функции обнуления координаты (см. рис. 6) в виде графов динамических особенностей (табл. 1) с учетом критерия отождествления существенных признаков ряда динамических характеристик, учитывающих специфику исходной задачи. В частности, использование критерия отождествления условных динамических состояний «покоя-запирания» позволяет отображать совокупность динамических состояний объекта в виде «замкнутых» графов. Учет критерия отождествления динамических состояний резонанса между собой позволяет представить совокупность динамических состояний в виде графов, образованных парами вершин «обнуление-резонанс», связанными между собой формами динамических взаимодействий с помощью направленных дуг.



**Рис. 6.** Частотная функция обнуления координаты  $y_1$  с учетом критических точек: 1 – интервалы знакопостоянства  $A_{11}(\omega)$ , удовлетворяющего условию  $\gamma < \gamma_0$ ; 2 – интервалы знакопостоянства для  $\gamma = \gamma_0$ ; 3 –  $\gamma_0 < \gamma < \gamma_1$ ; 4 –  $\gamma = \gamma_1$ ; 5 –  $\gamma_1 < \gamma < \gamma_2$ ; 6 –  $\gamma = \gamma_2$ ; 7 –  $\gamma_2 < \gamma$  ( $l_1$  – уровень  $\omega_1^2$ ,  $l_2$  – уровень  $\omega_2^2$ ,  $l_3$  – уровень парциальной частоты  $n_1^2$ ,  $l_4$  – график частотной функции  $\omega_{01}^2 = n_2^2 + \gamma\Delta_2^2$  обнуления амплитуды колебания координаты  $y_1$ )

**Fig. 6.** Frequency function of coordinate zeroing  $y_1$  taking into account the critical points: 1 – constancy intervals  $A_{11}(\omega)$  satisfying the condition  $\gamma < \gamma_0$ , 2 – constancy intervals for  $\gamma = \gamma_0$ , 3 –  $\gamma_0 < \gamma < \gamma_1$ , 4 –  $\gamma = \gamma_1$ , 5 –  $\gamma_1 < \gamma < \gamma_2$ , 6 –  $\gamma = \gamma_2$ , 7 –  $\gamma_2 < \gamma$  ( $l_1$  – level  $\omega_1^2$ ,  $l_2$  – level  $\omega_2^2$ ,  $l_3$  – partial frequency level  $n_1^2$ ,  $l_4$  – frequency function graph  $\omega_{01}^2 = n_2^2 + \gamma\Delta_2^2$  of zeroing the oscillation amplitude of coordinate  $y_1$ )

**Таблица 1.** Динамические инварианты массоинерционного элемента  $y_1$   
**Table 1.** Dynamic invariants of mass-inertial element  $y_1$

№	1	2	3	4
I	$\gamma < \gamma_0$	$\gamma = \gamma_0$	$\gamma_0 < \gamma < \gamma_1$	$\gamma = \gamma_1$
II	$S_0^2$	$S_1^2$	$S_1^2$	$S_0^1$
II I				

Окончание таблицы 1

№	1 $F_2^1$	2 $F_1^2$	3 $F_2^2$	4 $F_1^1$
IV				
V				
VI	$S_0^2 F_2^1$	$S_1^2 F_1^2$	$S_1^2 F_2^2$	$S_0^1 F_1^1$
№	5	6	7	
I	$\gamma_1 < \gamma < \gamma_2$	$\gamma = \gamma_2$	$\gamma_2 < \gamma$	
II	$S_1^2$	$S_0^1$	$S_1^2$	
III				
IV	$F_2^2$	$F_1^1$	$F_2^2$	
V				
VI	$S_1^2 F_2^2$	$S_0^1 F_1^1$	$S_1^2 F_2^2$	

Использование обобщенного критерия отождествления состояний обнуления и резонансов между собой приводит к отображению динамических состояний в виде графов, образованных единственными вершинами, которые имеют петли, отображающие формы динамических состояний (см. табл.1, стр. III). Таким образом, с обобщенной точки зрения динамические особенности объекта механической колебательной системы могут быть отображены количеством положительных и отрицательных форм динамических взаимодействий.

2. Совокупность динамических форм взаимодействий объекта механической колебательной системы в зависимости от коэффициента связности внешних воздействий может быть отображена на основе частотной функции

обнуления координаты (см. рис. 6) в виде графов динамических форм с учетом критериев отождествления признаков ряда динамических характеристик

В частности, использование критерия отождествления условных динамических состояний «покоя-запирания» позволяет отобразить совокупность динамических состояний объекта в виде «замкнутых» графов. Учет критерия отождествления динамических форм взаимодействий одинаковой направленности позволяет представить совокупность динамических форм в виде графов, образованных парами вершин «плюсительная форма- отрицательная форма», «связанными» между собой динамическими состояниями с помощью направленных дуг.

Использование обобщенного критерия отождествления форм без учета их направленно-

сти приводит к отображению динамических особенностей в виде графов, образованных одной вершиной с петлями, отображающими формы динамических состояний (см. табл. 1, стр. V).

С обобщенной точки зрения динамические особенности объекта механической колебательной системы могут быть отображены количеством состояний обнуления координат и количеством резонансов.

Для фиксированного коэффициента связности  $\gamma$  динамические особенности могут быть представлены в виде интегральных характеристик динамических состояний  $S_j^i$ , где  $i$  – количество резонансов,  $j$  – количество состояний обнуления (см. табл. 1, стр. II), а также интегральных характеристик динамических форм  $F_l^k$ , где  $l$  – количество отрицательных форм взаимодействий, а  $k$  – количество положительных форм взаимодействий (см. табл. 1, стр. VI). Общее количество динамических особенностей может быть обозначено в виде  $S_j^i F_l^k$  (см. табл. 1, стр. VI). Таким образом, динамические особенности механической колебательной системы с учетом характера внешнего воздействия имеют интегральные характеристики вида  $S_0^1 F_1^1$ ,  $S_0^2 F_2^1$ ,  $S_1^2 F_1^2$ ,  $S_1^2 F_2^2$ .

Смена объекта, динамическое состояние которого оценивается, может привести к изменению совокупности динамических инвариантов.

### Метод оценки совокупности динамических особенностей на основе частотной функции в зависимости от объекта

Наравне с передаточным отношением  $W_{11}$ , используемым для оценки динамических особенностей массоинерционного элемента  $m_1$ , выбранного в качестве объекта, может быть рассмотрено передаточное отношение  $W_{22}$  для оценки динамических особенностей массоинерционного элемента  $m_2$ :

$$W_{22} = \frac{\bar{y}_2}{Q_2} = \frac{\gamma(m_1 p^2 + k_1 + k_2) + k_2}{(m_1 p^2 + k_1 + k_2)(m_2 p^2 + k_2 + k_3) - k_2^2},$$

где  $Q_2$  – рассматривается как входной сигнал, а  $y_1$  – как выходной.

Для учета динамических особенностей может быть построена амплитудно-частотная характеристика, зависящая от коэффициента связности внешних возмущений  $\gamma$ :

$$A_{22}(\omega) = \left. \frac{\bar{y}_2}{Q_2} \right|_{p=j\omega} = \frac{-m_1(\omega^2 - [n_1^2 + \frac{\Delta_1^2}{\gamma}])}{m_1 m_2 (\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2)}. \quad (4)$$

Частотные интервалы знакопостоянства амплитудно-частотной характеристики (4) однозначно определяются для любого фиксированного  $\gamma$  коэффициента связности внешних воздействий. Соответствующая частотная функция обнуления аргумента коэффициента связности определяется из условий равенства нулю числителя дробно-рационального выражения (4):

$$\omega_{02}^2 = n_1^2 + \frac{\Delta_1^2}{\gamma}. \quad (5)$$

Частотная функция обнуления (5) амплитуды колебания объекта, динамическое состояние которого оценивается, определяет критические значения коэффициента связности, в которых частотная функция принимает нулевое значение и совпадает с частотами собственных колебаний:

$$\gamma_{20} = \frac{-\Delta_1^2}{n_1^2},$$

$$\gamma_{21} = \frac{\Delta_1^2}{\omega_1^2 - n_1^2},$$

$$\gamma_{22} = \frac{\Delta_1^2}{\omega_2^2 - n_1^2}.$$

Критические значения коэффициента связности определяют разбиение области  $(-\infty, 0) \cup (0, \infty)$  всевозможных значений коэффициента связности на непересекающиеся множества  $(-\infty, \gamma_1)$ ,  $\{\gamma_1\}$ ,  $(\gamma_1, \gamma_0)$ ,  $\{\gamma_0\}$ ,  $(\gamma_0, 0)$ ,  $(0, \gamma_2)$ ,  $\{\gamma_2\}$ ,  $(\gamma_2, \infty)$ , в каждом из которых амплитудно-частотная характеристика может быть представлена графиками динамических особенностей (см. рис. 7) графиком частотной функции обнуления).

Частотная функция применяется для отображения совокупностей динамических состояний и форм взаимодействий с учетом критериев отождествления признаков характеристик, раскрывающих существенные свойства решения задачи.

Совокупность особенностей объекта механической колебательной системы в зависимости от коэффициента связности внешних воздействий определяется по частотной функции обнуления координаты (рис. 7) в обобщенном виде (табл. 2), отображающем на разбиении области определения коэффициента связности (табл. 2, стр. II) количество динамиче-

ских состояний (табл. 2, стр. III) и форм взаимодействий (табл. 2, стр. IV).

Представленные динамические особенности (см. табл. 2, стр. IV) могут рассматриваться как своеобразные динамические инварианты или характеристики механических колебательных систем, находящиеся под воздействием связанных внешних силовых возмущений.

Совокупность динамических инвариантов для массоинерционного элемента  $u_1$  (см. табл. 1, стр. VI) отличается от совокупности динамических инвариантов массоинерционного элемента  $u_2$  (см. табл. 2, стр. IV), если совокупность инвариантов рассматривать как функцию, с помощью которой сопоставляется каждому коэффициенту связности определенный динамический инвариант. Вместе с тем, динамические инварианты (см. табл. 1, стр. VI; табл. 2, стр. IV), соответствующие различным массоинерционным элементам  $u_1$  и  $u_2$ , отличаются между собой как множества.

Следует отметить, что динамические инварианты  $S_1^2F_2^2$ ,  $S_1^2F_2^2$ ,  $S_0^2F_1^2$ ,  $S_1^2F_2^2$  определены на интервалах коэффициента связности  $\gamma$ , а  $S_0^1F_1^1$ ,  $S_1^2F_2^1$  определены для критических значений  $\gamma_1$ ,  $\gamma_0$ ,  $\gamma_2$ . Можно предположить, что инварианты  $S_0^1F_1^1$ ,  $S_1^2F_2^1$  обладают признаками «неустойчивости», если под «неустойчивостью» понимать существенное изменение инварианта при незначительном изменении коэффициента связности. В этом смысле, «интервальные» динамические инварианты  $S_1^2F_2^2$ ,  $S_1^2F_2^2$ ,  $S_0^2F_1^2$ ,  $S_1^2F_2^2$  могут рассматриваться как «устойчивые».

Можно полагать, что на основе рассмотренных динамических инвариантов могут быть построены интегральные характеристики динамических особенностей в виде количества форм динамических взаимодействий, количества критических состояний или их суммы.

## Заключение

Рассмотрена механическая колебательная система с двумя степенями свободы, находящаяся под воздействием зависимых силовых возмущений. Характер зависимости внешних силовых возмущений определяется с помощью так называемого коэффициента связности, представляющего собой пример настроичного параметра вибрационного состояния механической колебательной системы. В частном случае, когда коэффициент связности равен нулю, ди-

намическое состояние механической колебательной системы определяется приложением к одному массоинерционному элементу внешнего возмущения силовой природы. Совокупность динамических особенностей, соответствующая всевозможным частотам внешнего возмущения, в этом случае определяется одним режимом динамического гашения, двумя резонансами и определенным числом форм динамических взаимодействий. Рассмотрена задача определения совокупности динамических особенностей в зависимости от коэффициента связности. Показано, что совокупность динамических особенностей может быть построена на основе использования частотной функции обнуления амплитуды колебаний координаты массоинерционного элемента, выбранного в качестве объекта, динамическое состояние которого оценивается. Показано, что динамические особенности, выражаемые амплитудно-частотными характеристиками, могут быть отображены с помощью вариантов ориентированных графов, с учетом критериев отождествления существенных динамических признаков, связанных со спецификой постановки задачи. Показано, что построенные графы могут рассматриваться в качестве своеобразных инвариантов или интегральных характеристик элементов, выбранных в качестве объектов оценки динамических свойств механических колебательных систем.

Разработана методика оценки обобщенных динамических особенностей механических колебательных систем, включающих в свой состав вариационный параметр в виде коэффициента связности внешних возмущений силовой природы. Показано, что варьирование коэффициента связности изменяет существенные динамические особенности механических колебательных систем, выражаемые в количестве режимов обнуления амплитуд колебаний, резонансов и динамических форм взаимодействий объекта, динамическое состояние которого оценивается. В частности, указывается, что выбор специальных точечных или интервальных значений коэффициента связности позволяет «устранить» один из резонансов, «установить» режим динамического гашения на нулевую частоту внешнего возмущения или вообще «исключить» или наоборот «включить» возможность проявления режима обнуления амплитуды колебания. Следует отметить, что подобные

специфические динамические особенности для точечных значений коэффициентов связности обладают признаками неустойчивости и требуют дополнительных исследований.

Таким образом, показано, что разработанный подход обладает потенциалом практи-

ческой значимости в направлении создания технологий оценки, контроля и формирования динамических состояний механических колебательных систем на основе встроенных настроенных параметров.

### Список литературы

1. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск : Наука, 2017. 724 с.
2. Стиславский А.Б., Цыгичко В.Н. Формальная постановка задачи обеспечения безопасности транспортного комплекса // Труды Института системного анализа РАН. 2009. № 41. С. 26–42.
3. Хохлов А.А. Динамика сложных механических систем. М. : МИИТ. 2002. 172 с.
4. Clarence W. de Silva. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton : CRC Press LLC, 2000. 957 p.
5. Harris C. M., Crede C.E. Shock and Vibration Handbook. New York : McGraw-Hill Book Co, 2002. 1457 p.
6. Копылов Ю.Р. Динамика процессов вибродарного упрочнения. Воронеж : Научная книга, 2011. 569 с.
7. Елисеев С.В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных и технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи). Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. 692 с.
8. Eliseev S.V., Eliseev A.V. Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects. Series: Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 252. Cham : Springer International Publishing, 2020. 521 p.
9. Методология системного анализа в задачах оценки, формирования и управления динамическим состоянием технологических и транспортных машин / С.В. Елисеев, А.В. Елисеев, Р.С. Большаков и др. Новосибирск : Наука, 2021. 679 с.
10. Елисеев С.В., Миронов А.С., Выонг К.Ч. Динамическое гашение колебаний при введении дополнительных связей и внешних воздействий // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. 2019. Т. 19. № 1. С. 38–44. DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-38-44.
11. Karnovskii I.A., Lebed E. Theory of Vibration Protection. Switzerland : Springer International Publishing, 2016. 708 p.
12. Хоменко А.П., Елисеев С.В., Ермошенко Ю.В. Системный анализ и математическое моделирование в мехатронике виброзащитных систем. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2012. 288 с.
13. Dynamics of mechanical systems with additional ties / S.V. Eliseev, A.V. Lukyanov, Yu.N. Reznik et al. Irkutsk : Publishing of Irkutsk State University, 2006. 316 p.
14. Елисеев С.В., Ермошенко Ю.В. Сочленения звеньев в динамике механических колебательных систем. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2012. 156 с.
15. Елисеев А.В. Особенности взаимодействия материальной частицы с вибрирующей поверхностью в зависимости от дополнительной силы с неудерживающей связью // Междунар. журн. прикл. и фундамен. исследований. 2013. № 3. С. 9–15.
16. Выонг К.Ч., Миронов А.С., Елисеев С.В. Методологические подходы в формировании структуры и параметров вибрационного поля вибростенда // Наукомекие и виброволновые технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий : материалы междунар. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. Ростов-на-Дону, 2018. С. 110–113.
17. Каргапольцев С.К., Елисеев С.В., Выонг К.Ч. Об особенностях установки и размещения вибровозбудителя технологической вибрационной машины // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 2 (42). С. 7–12. DOI 10.18324/2077-5415-2019-2-7-12.
18. Елисеев, С.В., Большаков Р.С., Ситов И.С. О влиянии избыточных связей между элементами на динамические свойства технических объектов // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 2 (46). С. 7–11. DOI 10.18324/2077-5415-2020-2-7-11.
19. Механические цепи в задачах коррекции динамических состояний вибрационных технологических машин / С.В. Елисеев, С.К. Каргапольцев, Р.С. Большаков и др. // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2020. Т. 24. № 4 (153). С. 718–727. DOI 10.21285/1814-3520-2020-4-718-727.
20. Лурье А.И. Операционное исчисление и применение в технических приложениях. М. : Наука. 1959. 368 с.

### References

1. Makhutov N.A. Bezopasnost' i riski: sistemnye issledovaniya i razrabotki [Security and risks: systems research and development]. Novosibirsk: Nauka publ., 2017. 724 p.
2. Stislavskii A.B., Tsygichko V.N. Formal'naya postanovka zadachi obespecheniya bezopasnosti transportnogo kompleksa [Formal statement of the task of ensuring the safety of the transport complex]. Trudy Instituta sistemnogo analiza RAN [Proceedings of the Institute of System Analysis RAS], 2009. №. 41. pp. 26-42.
3. Khokhlov A.A. Dinamika slozhnykh mekhanicheskikh sistem [Dynamics of complex mechanical systems]. Moscow: MIIT Publ., 2002. 172 p.
4. Clarence W. de Silva. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton : CRC Press LLC, 2000. 957 p.
5. Harris C. M., Crede C.E. Shock and Vibration Handbook. New York : McGraw-Hill Book Co, 2002. 1457 p.
6. Kopylov Yu.R. Dinamika protsessov vibroudarnogo uprochneniya [Dynamics of Vibroimpact Hardening Processes.] Voronezh: Nauchnaya kniga Publ., 2011. 569 p.
7. Eliseev S.V. Prikladnoi sistemnyi analiz i strukturnoe matematicheskoe modelirovanie (dinamika transportnykh i tekhnologicheskikh mashin: svyaznost' dvizhenii, vibratsionnye vzaimodeistviya, rychazhnye svyazi) [Applied system analysis and structural mathematical modeling (dynamics of transport and technological machines: connectivity of motions, vibrational interactions, lever linkages)]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018, 692 p.

8. Eliseev S.V., Eliseev A.V. Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects. Series: Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 252. Cham : Springer International Publishing, 2020. 521 p.
9. Eliseev S.V., Eliseev A.V., Bol'shakov R.S., Khomenko A.P. Metodologiya sistemnogo analiza v zadachakh otseki, formirovaniya i upravleniya dinamicheskim sostoyaniem tekhnologicheskikh i transportnykh mashin [Methodology of system analysis in the problems of evaluation, formation and control of the dynamic state of technological and transport machines]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2021. 679 p.
10. Eliseev, S.V., Mironov A.S., Vyong K.T. Dinamicheskoe gashenie kolebanii pri vvedenii dopolnitel'nykh svyazei i vneshnikh vozdeistvii [Dynamic damping of oscillations with the introduction of additional ties and external influences]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Don State Technical University]. 2019, Vol. 19, no 1, pp. 38-44. DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-38-44.
11. Karnovskii I.A., Lebed E. Theory of Vibration Protection. Switzerland : Springer International Publishing, 2016. 708 p.
12. Khomenko A.P., Eliseev S.V., Ermoshenko Yu.V. Sistemnyi analiz i matematicheskoe modelirovaniye v mekhatronike vibrozashchitynykh sistem [System analysis and mathematical modeling in mechatronics of vibration protection systems]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2012. 288 p.
13. Dynamics of mechanical systems with additional ties / S.V. Eliseev, A.V. Lukyanov, Yu.N. Reznik et al. Irkutsk : Publishing of Irkutsk State University, 2006. 316 p.
14. Eliseev S.V., Ermoshenko Yu.V. Sochleneniya zven'ev v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistem [Articulations of links in the dynamics of mechanical oscillatory systems]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2012. 156 p.
15. Eliseev A.V. Osobennosti vzaimodeistviya material'noi chasty s vibriruyushchei poverkhnost'yu v zavisimosti ot dopolnitel'noi sily s neuderzhivayushchei svyaz'yu [Features of the interaction of a material particle with a vibrating surface depending on the additional force with a non-retaining bond]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii* [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2013, no 3, pp. 9-15.
16. Vyong K.T., Mironov A.S., Eliseev S.V. Metodologicheskie podkhody v formirovaniy struktury i parametrov vibratsionnogo polya vibrostenda [Methodological approaches to the formation of the structure and parameters of the vibration field of the shaker]. *Materialy mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma tekhnologov-mashinostroitelei «Naukoemkie i vibrovolnovye tekhnologii obrabotki detalei vysokotekhnologichnykh izdeliy»* [Proceedings of the international scientific symposium of technologists – machine builders «Science-intensive and vibration-wave technologies for processing parts of high-tech products»]. Rostov-on-Don, 2018, pp. 110-113.
17. Kargapol'tsev S.K., Eliseev S.V., Vyong K.T. Ob osobennostyakh ustanovki i razmeshcheniya vibrovzbuditelya tekhnologicheskoi vibratsionnoi mashiny [About the features of installation and placement of a vibration exciter of a technological vibration machine]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technology]. 2019, no 2 (42), pp. 7-12. DOI 10.18324/2077-5415-2019-2-7-12.
18. Eliseev S.V., Bolshakov R.S., Sitov I.S. O vliyanii izbytochnykh svyazei mezhdu elementami na dinamicheskie svoistva tekhnicheskikh ob'ektov [On the influence of redundant connections between elements on the dynamic properties of technical objects]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technology]. 2020, no 2 (46), pp. 7-11. DOI 10.18324/2077-5415-2020-2-7-11.
19. Eliseev S.V., Kargapol'tsev S.K., Bolshakov R.S., Eliseev A.V. Mekhanicheskie tsepi v zadachakh korrektsii dinamicheskikh sostoyaniy vibratsionnykh tekhnologicheskikh mashin [Mechanical circuits in the problems of correcting the dynamic states of vibration technological machines]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]. 2020, Vol. 24, no 4 (153), pp. 718-727. DOI 10.21285/1814-3520-2020-4-718-727.
20. Lur'e A.I. Operatsionnoe ischislenie i primenenie v tekhnicheskikh prilozheniyakh [Operational calculus and application in technical applications]. Moscow: Nauka Publ., 1959. 368 p.

### Информация об авторах

**Елисеев Андрей Владимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: eavsh@ya.ru  
**Большаков Роман Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: bolshakov\_rs@mail.ru

### Information about the authors

**Andrey V. Eliseev**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Department «Mathematics», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: eavsh@ya.ru  
**Roman S. Bol'shakov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Department «Operation Management», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: bolshakov\_rs@mail.ru

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ТРАНСПОРТ**

**TRANSPORT**

## Роботизация технологии допуска бригад к выполнению путевых работ в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой

Т. Н. Асалханова, И. Г. Карпов, С. Ю. Лагерев✉

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

✉ lagerev.sergey@gmail.com

### Резюме

В статье рассматриваются проблемы, которые возникают при организации технологических процессов производства путевых работ в дистанциях пути, в том числе с учетом интеграции данных из различных информационных систем управления в Единую корпоративную автоматизированную систему управления инфраструктурой. В результате проведения исследования выявлено, что при выходе на работу путевых бригад происходят большие потери рабочего времени руководителей среднего звена, рабочих, диспетчеров дистанции пути из-за оформления допуска бригад к выполнению работ в Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой. Допуск бригад к выполнению путевых работ связан с проверкой наличия предупреждений в автоматизированной системе выдачи и отмены предупреждений, представления согласованного технологического «окна» в автоматизированной системе планирования и выполнения «окон», предупреждений ограничения скорости движения подвижного состава. Проверки проводит диспетчер дистанции пути как в системе Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой, так и в вышеуказанных системах, так как имеются разногласия в данных, что увеличивает время на оформление допуска бригад. Кроме того, мастер дорожный должен проверить контрольные параметры технолого-нормировочных карт, которые указаны в рабочих заданиях, диспетчер – наличие плановых сигналистов, исполнителей работ в соответствии с нормами времени, а для этого необходимо провести сверку данных в Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой с фактическим наличием работников. Такие операции не исключают человеческий фактор: отвлечение диспетчера или мастера дорожного от проверок, ошибок при сравнении информации в разных системах, повторные проверки и т.п. Это увеличивает трудоемкость оформления допуска бригад к проведению путевых работ и снижает производительность труда работников дистанции пути. Эти обстоятельства и обусловили актуальность проводимых исследований, и разработку предложений по оптимизации процесса допуска бригад к выполнению путевых работ с использованием цифровых технологий.

### Ключевые слова

Единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой, диспетчер, дистанция пути, допуск, железнодорожный путь, инфраструктурный комплекс, путевые работы, роботизация, технологический процесс, текущее содержание пути, цифровые технологии, RPA

### Для цитирования

Асалханова Т. Н. Роботизация технологии допуска бригад к выполнению путевых работ в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой / Т. Н. Асалханова, И. Г. Карпов, С. Ю. Лагерев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 1 (73). С. 54–63. DOI 10.26731/1813-9108.2022.1(73).54-63.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 22.10.2021 г.; поступила после рецензирования: 24.11.2021 г.; принята к публикации: 21.01.2022 г.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по государственной работе «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Анализ факторов, влияющих на процессы управления путевым комплексом и автоматизацию этих процессов» № 121050600027-6 от 06.05.2021 г., руководитель Дмитрий Александрович Ковенькин.

## Robotization of track crews admission technology in a unified corporate automated infrastructure management system

Т. Н. Асалханова, И. Г. Карпов, С. Ю. Лагерев✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ lagerev.sergey@gmail.com

### Abstract

The article considers the problems that arise while organizing of technological processes of track works in track sections, including the integration of data from various information management systems into a single corporate information system of infrastructure

management. The study revealed that in the work of track crews, large working time losses of middle managers, workers and dispatchers of track sections take place associated with the registration of the work permit of crews in the single corporate information system of infrastructure management. The admission of crews to the execution of track works involves checks for existing warnings in the automated system of issuing and cancelling warnings, the provision of the agreed technological "window" in the automated system of planning and execution of "windows" and warnings to limit the rolling stock speed. Checks are carried out by the dispatcher of the track section both in the single corporate information system of infrastructure management and in the above systems, as there are discrepancies in the data, which increases the time for registration of admittance of crews. In addition, the road foreman must check the control parameters of the technical and normative maps, which are specified in the work tasks, the dispatcher - the availability of planned signalers, executors of works in accordance with the time standards, and this requires the data reconciliation in the single corporate information system of infrastructure management with the actual presence of workers. Such operations do not rule out the human factor - the distraction of the dispatcher or road foreman during the checks, errors in comparing data in different systems, repeated checks, etc., which increases the labor volume of team registration for track works and reduces the productivity of the distance employees. These circumstances have conditioned the relevance of the conducted research and development of proposals to improve the conditions of the admission of crews to carry out track works using digital technologies.

### Keywords

Unified corporate automated infrastructure management system, railway dispatcher, track section, clearance, railroad track, infrastructure complex, track operations, robotization, process, current track maintenance, digital technology, RPA

### For citation

Asalkhanova T. N., Karpov I. G., Lagerev S. Yu. Robotizatsiya tekhnologii dopuska brigad k vypolneniyu putevykh rabot v edinoi korporativnoi avtomatizirovannoii sisteme upravleniya infrastrukturoi [Robotization of track crews admission technology in a unified corporate automated infrastructure management system]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2022, No. 1 (73), pp. 54–63.– DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).54-63

### Article Info

Received: 22.10.2021; revised: 24.11.2021; accepted: 21.01.2022.

### Acknowledgement

The work was carried out within the framework of the state task on state work "Conducting applied scientific research" on the topic «Analysis of factors affecting the management processes of the track complex and automation of these processes» No. 121050600027-6 06.05.2021, head Dmitry Aleksandrovich Kovenkin.

### Введение

При организации текущего содержания железнодорожного пути предусматривается выполнение работ по устранению неисправностей, которые могут привести к нарушению целостности пути. При этом необходимо предусмотреть все условия для обеспечения бесперебойного движения поездов, соблюдая безопасные условия труда для работников инфраструктуры, которые выходят на путь для проведения путевых работ [1–6].

Ежедневная работа структурных подразделений инфраструктурного комплекса по текущему содержанию пути связана с выполнением поставленных задач по текущему содержанию пути и сооружений, устранению неисправностей пути, выявленных различными средствами мониторинга и диагностики [6, 7]. В настоящее время дистанции пути планируют работы, создают инциденты, формируют рабочие задания (РЗ) и ведут учет фактического выполнения работ в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой (ЕК АСУИ) [8]. Для структурных

подразделений путевого хозяйства в системе разработаны несколько функциональностей и подсистем по допуску бригад к путевым работам, модификации функции подтверждения диспетчером дистанции пути (ПЧД) выполнения работ с ограничениями скорости до 60 км/м и менее [9].

Для исследования проблем организации путевых работ, потерь рабочего времени специалистов дистанции пути при работе с системой ЕК АСУИ проводился анализ на дистанциях пути Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры с 2019 по 2021 гг.

Технология допуска бригад к путевым работам в системе Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой

В соответствии с нормативными документами ОАО «РЖД» в путевом хозяйстве введена комплексная система обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений, а также разработан переход от планово-предупредительных ремонтов к проведению технического обслуживания пути по его факти-

ческому состоянию с учетом эксплуатационных условий [10]. Для выполнения работ, связанных с нарушением целостности рельсовой колеи, обязательно необходим допуск бригад с соблюдением всех контрольных параметров [11].

Ведение контрольных параметров по допуску путевых бригад к работам реализовано в приложении ЕК АСУИ – «Нормы времени». Параметры допуска могут быть введены как по типовым нормам времени технолого-нормировочным картам (ТНК), так и по местным ТНК, составленным дистанцией пути с учетом местных условий.

Полномочия по допуску бригад к путевым работам в системе предоставлены ПЧД, а проверку контрольных параметров он осуществляет с дорожными мастерами по эксплуатационным участкам (рис. 1) [9].



Рис. 1. Проверка контрольных параметров

Fig. 1. Checking the control parameters

При допуске бригад к выполнению путевых работ диспетчером и мастером дорожным учитываются особенности технологических процессов производства работ, выданные предупреждения, в том числе должны ли производиться работы в технологические «окна» [2, 4].

Диспетчер должен разрешать выезд бригады на линию, когда имеются:

- назначение руководителя, имеющего право руководства бригадой;
- доклада руководителя производства работ о получении им целевого инструктажа по охране труда, количественном составе бригады и назначенных сигналистах, времени выезда к месту производства работ;
- проверка наличия предупреждения в автоматизированной системе ввода и отмены предупреждения (АСУ ВОП);
- проверки наличия согласованного технологического «окна» в автоматизированной системе оперативного анализа планирования и выполнения «окон» (АС АПВО) (рис. 2) [11].

В течение рабочего дня диспетчер должен знать, где на его участке находятся работающие бригады, вести учет с записью в журнале произвольной формы о месте их нахождения.

Выборочно в течение рабочей смены проверять местонахождение работающих бригад (не менее трех раз), применяя все имеющие средства связи, и докладывать руководителю дистанции пути обо всех происшествиях и других внештатных ситуациях [5, 11].

Рис. 2. Проверка параметров в Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой  
Fig. 2. Checking the parameters in the single corporate automated system of infrastructure management

## Анализ работы в системе Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой

Анализ трудозатрат по работе с ЕК АСУИ показал, что ежедневно диспетчер формирует в системе от 10 до 20 допусков к выполнению ремонтно-путевых работ с нарушением целостности рельсовой колеи и проверяет корректность заполнения контрольных параметров в рабочих заданиях, на что тратится до двух часов работы (рис. 3).

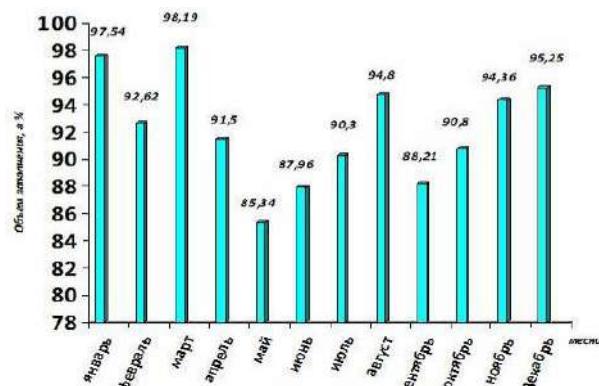


Рис. 3. Анализ статистики ошибок по допуску бригад в Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой

Fig. 3. Analysis of error statistics for the admission of teams in the single corporate automated system of infrastructure management

С 2021 г. в систему добавлена возможность для ПЧД и дорожных мастеров выявле-

ния инцидентов с ограничением скорости до 60 км/ч и менее, полученных от путеизмерительных вагонов, а также зарегистрированных вручную с источников «Путеизмерение». Автоматически информация о данных в инцидентах передается на мобильное рабочее место (МРМ) мастера дорожного. После этого инциденты принимаются в работу мастером. В типовой системе управления инцидентами (ТСИ) ЕК АСУИ передаются дополнительные статусы и информация об ответственном сотруднике, дате и времени начала, окончания работы, фото до и после выполнения работы, подтверждение геопозиции руководителя работ на начало/завершение работы (рис. 4).

В поле «Ответственный» в карточке инцидента отражается пользователь МРМ, который принял в работу инцидент или начал работу с инцидентом. Как правило, пользователь МРМ – это мастер дорожный.

Инциденты, переданные на МРМ, в системе имеют определенную цветовую палитру (рис. 5).

Подтверждено ПЧД

Завершено в МРМ

В работе на МРМ

Рис. 5. Цветовая легенда инцидентов в мобильном рабочем месте

Fig. 5. Color legend of incidents in mobile working place

Если диспетчер отклонил выполнение работы, то инцидент повторно передается в ра-

Рис. 4. Отражение в карточке инцидентов и передача данных на мобильное рабочее место

Fig. 4. Reflection in the incident card and data transfer to the mobile working place

боту на МРМ (из статуса «Отклонено ПЧД»). После этого мастером дорожным проводится корректировка, работа выполняется, и вновь данные передаются в ЕК АСУИ со статусом «Завершено в МРМ». Диспетчер повторно подтверждает или отклоняет выполнение работы.

В результате проведенного анализа работы диспетчера в системе ЕК АСУИ выявлены следующие проблемы:

- основная доля ошибок приходится на отсутствие в ЕК АСУИ выдаваемых предупреждений, зарегистрированных в АСУ ВОП на выполнение работ по текущему содержанию пути, что приводит к дополнительным сравнениям двух систем и ручному вводу данных в РЗ из АСУ ВОП;

- отсутствие некоторых заявок на «окна» в ЕК АСУИ, так как не полностью проводится интеграция данных из системы АС АПВО, что также приводит к корректировке данных в РЗ и созданию заявки на «окна»;

- иногда наблюдается нарушение состава исполнителей, то есть мастер дорожный или распределитель работ допустили ошибки при формировании РЗ в системе;

- в отдельных случаях в РЗ, заявленное количество монтеров не соответствует ТНК, в том числе по разрядности выполняемой работы, что тоже говорит о невнимательности при формировании РЗ (человеческий фактор).

Таким образом, диспетчер следит не только за информацией, которая должна интегрироваться из других систем, но и проверяет внимательность исполнителей. Это существенно влияет на работу диспетчера и увеличивает

количество рутинных операций.

Кроме вышеперечисленных трудозатрат в системе ЕК АСУИ, выявлены и другие рутинные операции, которые выполняет диспетчер по внесению данных в разные автоматизированные системы управления. Это связано с тем, что существуют проблемы с интеграцией данных в режиме реального времени из баз, с которыми работает диспетчер, приходится дублировать информацию в разные системы, что приводит к сокращению времени на оперативное управление дистанцией пути.

Затраты рабочего времени по работе в системе ЕК АСУИ у дорожного мастера тоже достаточно высоки: проверка контрольных параметров, подтверждение и контроль инцидентов, формирование РЗ (рис. 6).

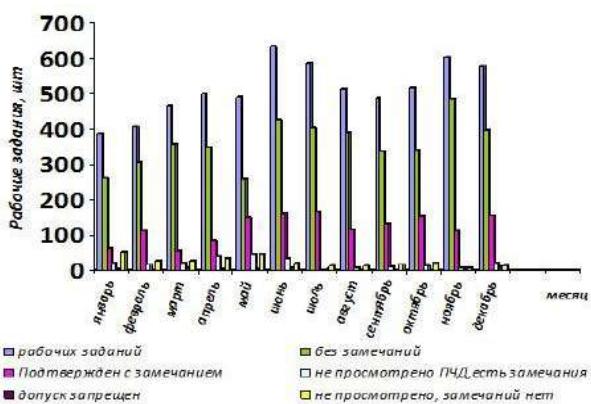


Рис.6. Анализ рабочих заданий в Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой по одной из дистанций пути в 2020 г.  
Fig. 6. Analysis of work assignments in single corporate automatized system of infrastructure management for one of the track maintenance department for 2020

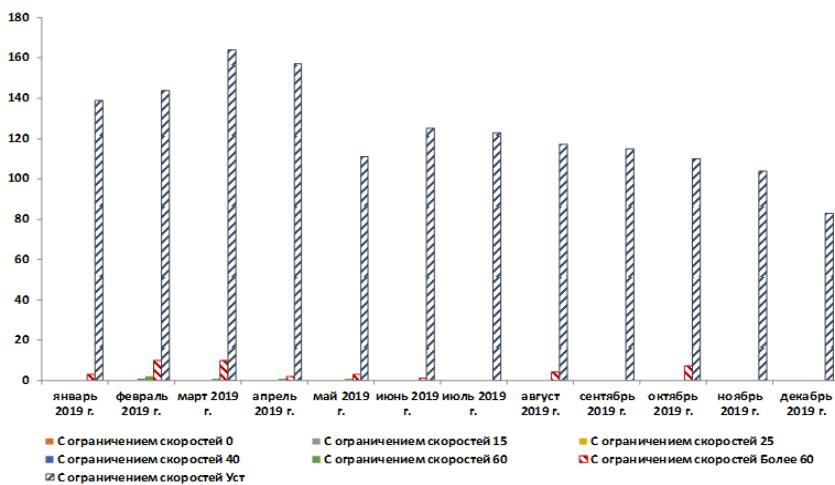


Рис. 7. Анализ инцидентов с ограничением скоростей на участке дистанции пути в 2019 г.

Fig. 7. Analysis of speed limit incidents on the section of the track distance in 2019

Ежедневно мастер дорожный в системе создает и закрывает от 20 до 140 РЗ, а проверяет и закрывает инциденты с ограничением скоростей значительно больше (рис. 7).

Данные обстоятельства приводят к отвлечению дорожного мастера от организации и контроля проведения путевых работ. Трудозатраты оцениваются более чем в 3 часа, то есть 25% рабочего времени уходит на работу в системе.

Учитывая, что в ЕК АСУИ приходится заходить несколько раз, то возникают еще потери времени на ожидание отклика системы, формирование отчетов (особенно после 12 часов местного времени). Отчеты из системы загружаются в электронные таблицы MS Excel со шрифтом в 6 пунктов, что приводит к необходимости переформатировать отчетные формы, так как они нечитабельны, на это также уходит много времени. Диспетчеру необходимо постоянно осуществлять контроль за системой, чтобы не возник тайм-аут, иначе придется терять время на вход в систему заново. В результате этого у диспетчера и мастеров возникают непроизводительные потери, которые не позволяют повысить эффективность их работы.

Потери рабочего времени на работу с системой возникают и у других работников дистанции пути – распределителей работ, контролеров по состоянию пути, инженеров производственно-технических отделов и других специалистов, руководителей дистанций пути, специалистов и руководителей служб дирекций инфраструктуры.

### Предложения по улучшению технологии допуска бригад к выполнению путевых работ

Цифровая трансформация ОАО «РЖД», которая проводится в холдинге, позволила пересмотреть и бизнес-процессы, связанные с техническим обслуживанием элементов верхнего строения пути. Особенно это актуально на Восточном полигоне в условиях повышенных нагрузок на путь – в связи с увеличением длины и веса подвижного состава (планируется запуск поездов массой до 7100 т и грузовых вагонов на 3-4-осных тележках), скорости движения, сокращением интервалов между поездами, снижением возможностей дистанциям пути проводить некоторые плановые виды работ в короткие промежутки времени между поездами. Данные обстоятельства

значительно влияют на повышение нагрузки на всех работников путевого хозяйства в организации, планировании и контроле за выполнением путевых работ.

Будущее формирование путевого хозяйства требует и пересмотра вопросов планирования и организации путевых работ с точки зрения оптимизации технологических процессов, снижения рутинных операций, увеличения производительности труда работников, усовершенствования информационных систем управления, в том числе системы ЕК АСУИ, для эффективного принятия управленческих решений и формирования новых моделей управления путевым хозяйством [12, 13].

В рамках реализации Комплексной программы инновационного развития холдинга «РЖД» предусмотрены задачи внедрения программных роботов (RPA), которые уже начали выполнять стандартные операции [14]. Например, в 2021 г. зарегистрировано несколько программ-сценариев для программных роботов с целью тестирования взаимодействия систем КАС АНТ с ЕК АСУИ, ТС-2 и ТСИ ЕК АСУИ. Программы содержат файлы сценариев, в которых прописаны алгоритмы исполнения заданного набора операций бизнес-процессов. Программные роботы предназначены для выполнения операций передачи данных между смежными автоматизированными системами (АС) ОАО «РЖД» вместо пользователей этих систем [15, 16].

Для снижения непроизводительных потерь рабочего времени диспетчера, мастера дорожного при работе с системой ЕК АСУИ, в частности по допуску бригад к путевым работам, организации и контролю за выполнением путевых работ, предлагаем дальнейшее развитие системы ЕК АСУИ в части внедрения технологии роботизации RPA.

На примере внедрения программных роботов взаимодействия систем КАС АНТ и ЕК АСУИ, ТСИ и ТС-2, технология RPA не нарушит работу системы ЕК АСУИ, но интегрирует данные по предупреждениям, отказам, представлению «окон» из других систем в режиме реального времени и снижает нагрузку на работников по вводу и проверке информации между системами [17].

RPA (автоматизация рутинных операций) – это цифровая технология, основанная на внедрении программных роботов в информационно-аналитических системах [18].

RPA позволит в системе выполнять следующие действия: автоматически формировать РЗ из инцидентов; заполнять информацию в РЗ, включая выбор ТНК; взаимодействовать с различными автоматизированными системами, почтой; сравнивать и проверять в нескольких приложениях данные; осуществлять автоматизированную проверку информации, вводимой человеком; регистрировать завершение РЗ по сообщению руководителя работ [14 – 19].

На рис. 8 представлен алгоритм внедрения технологии RPA в ЕК АСУИ, разработанный авторами, с учетом создания сквозного бизнес-процесса по допуску бригад к путевым работам.

### Заключение

В последнее время в компании широко внедряется фабрика роботов в различных хозяйствах. Разработано и внедрено более 1000 проектов, которые показали значительные результаты по повышению эффективности использования цифровых технологий отечественных разработок и снижению рутинных операций (автоматизировано более 980 операций), при этом скорость обработки данных существенно возросла по сравнению с работой специалистов в информационных системах.

В результате внедрения цифровой технологии RPA в систему ЕК АСУИ, а в дальнейшем и искусственного интеллекта, возможно значительно повысить производительность

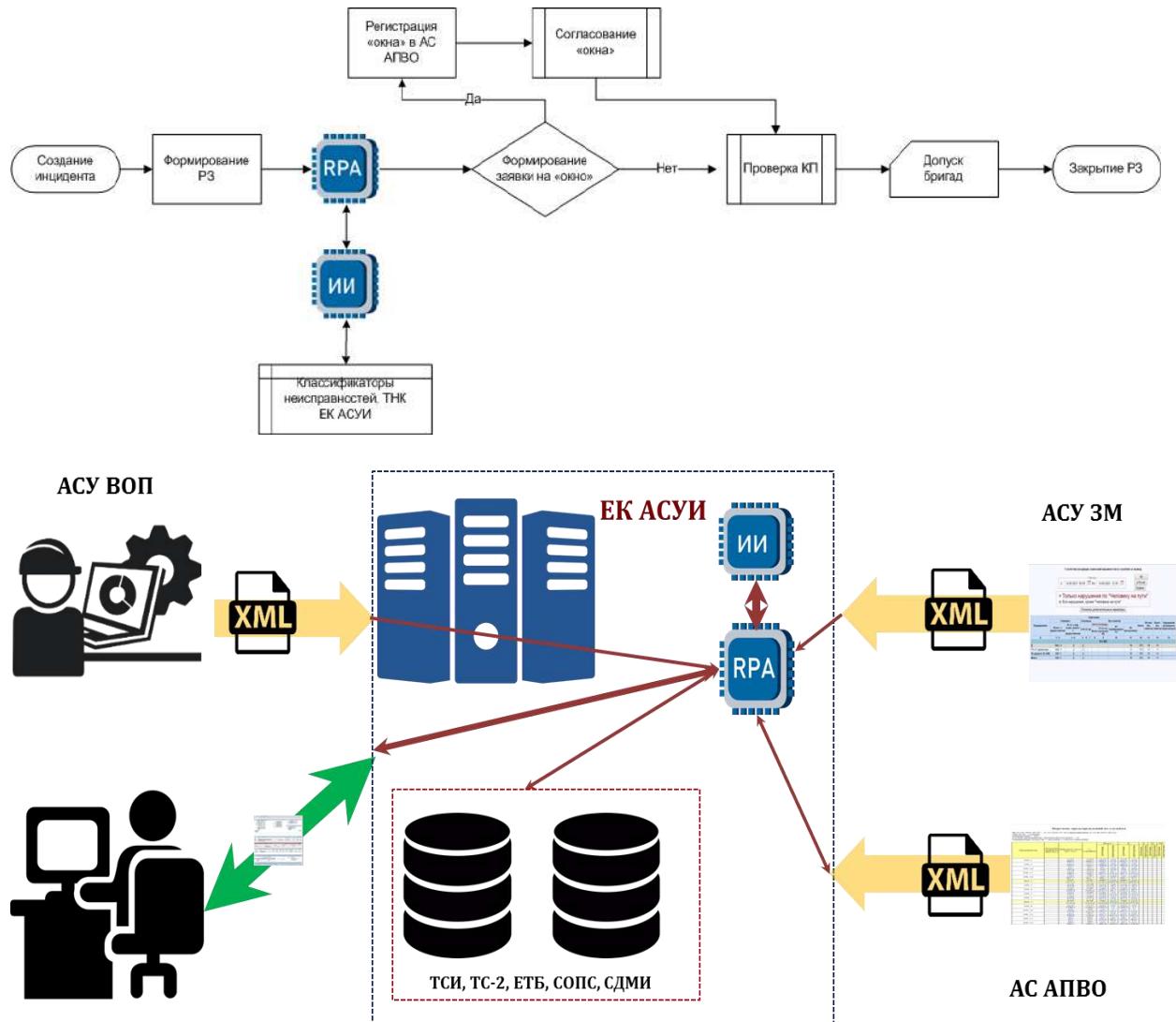


Рис. 8. Алгоритм внедрения RPA в Единой корпоративной автоматизированной системе Управления инфраструктурой

Fig. 8. The algorithm for implementing RPA into the single corporate automated system of infrastructure management

труда работников путевого хозяйства и других хозяйств, обслуживающих объекты железнодорожной инфраструктуры, за счет снижения рутинных операций (не менее 15%), отказа от дублирования информации в разные системы и на бумажные носители, исключения влияния человеческого фактора на ввод информации в систему, а также получение достоверных данных о состоянии железнодорожного пути из одного источника – ЕК АСУИ.

Роботизация технологий допуска бригад к выполнению путевых работ, организации и

контролю инцидентов, связанных со снижением скоростей движения подвижного состава на 60 км/ч и менее, позволит перейти и к дальнейшему выполнения задач, поставленных в стратегии развития железнодорожного транспорта в области цифровой трансформации, комплексной программы инновационного развития холдинга «РЖД» и в других нормативных документах, включая и постановления Правительства Российской Федерации о цифровой экономике страны [14–24].

### Список литературы

1. Положение о системе ведения путевого хозяйства ОАО «РЖД» : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 31.12.2015 г. № 3212 р // Кодекс : официал. портал. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556494188?marker=65201M> (дата обращения 20.06.2021).
2. Инструкция о порядке планирования, разработки, предоставления и использования технологических «окон» для ремонтных и строительно-монтажных работ в ОАО «РЖД» : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 25.02.2019 г. № 348/р. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локал. сети (дата обращения 28.08.2021).
3. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. приказом Минтранса России от 21.12.2010 г. № 286 // Трудовой десант : сайт. URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/57/> (дата обращения 18.09.2021).
4. Инструкция по обеспечению безопасности движения поездов при производстве путевых работ : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.12.2012 г. № 2540р // Кодекс : официал. портал. URL: <https://docs.cntd.ru/document/> (дата обращения 23.04.2021).
5. Технические условия на работы по реконструкции и ремонту железнодорожного пути : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18.01.2013 г. № 75р // Кодекс : официал. портал. URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/43> (дата обращения 16.07.2021).
6. Положение о порядке организации ограждения мест производства работ на объектах инфраструктуры ОАО «РЖД» при выполнении технологического процесса : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 19 августа 2015 г. № 2087р // Mool.com : сайт. URL: <https://mool.com/d/otraslevye-i-vedomstvennye-normativno-metodicheskie-dokumenty/proektirovaniye-i-stroitelstvo-zheleznykh-dorog/32138/> (дата обращения 31.08.2021).
7. Колисниченко Е.А. Организация пропуска мобильных средств дефектоскопии на Восточном полигоне // Транспорт Урала. 2021. № 2 (69). С. 68–72.
8. Суслов О.А., Федорова В.И. Перспективные подходы к прогнозному моделированию деградационных процессов элементов верхнего строения пути и их применение при создании цифровых двойников // Вестник ВНИИЖТ. 2021. Т. 80. № 5. С. 251–259. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259>.
9. Типовая система управления текущим содержанием объектов эксплуатационной инфраструктуры (тс-2) (хозяйство пути) : получение допуска путевых бригад к работе : операционная инструкция / ЕКАСУИ РЖД. [М.], 2019. 14 л.
10. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 г. № 2288р. // Кодекс : официал. портал. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456052478> (дата обращения 18.09.2021).
11. Положение об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.11.2019 г. № 2675р. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локал. сети (дата обращения 04.10.2021).
12. Сивицкий Д.А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте // Вестник Сиб. гос. ун-та путей сообщ. 2021. № 2 (57). С. 33–41. DOI: 10.52170/1815-9265\_2021\_57\_33.
13. Глубоков Н.Н., Мироненко Е.В. Система «Электронное путевое хозяйство» // Тр. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2019. № 3. С. 30–34.
14. Комплексная программа инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года // Западно-Сибирская железная дорога : сайт. URL: <https://zsrd.rzd.ru/> (дата обращения 01.09.2021).
15. Свидетельство RU 2021660510. Программный робот для функционального тестирования взаимодействия КАСАНТ и ЕК АСУИ КМО (ПР-ГВЦ-ЦТС-ИНФР-010) : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / ОАО «Российские железные дороги». № 2021615378 ; зарегистр. 13.04.2021. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46481265> (дата обращения 15.09.2021).
16. Свидетельство 2021616595. Программный робот для тестирования базовых функций ЕК АСУИ ТСИ и ЕК АСУИ ТС-2 (ПР-ГВЦ-ЦТС-ИНФР-002) : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / ОАО «Российские железные дороги». № 2021615443 ; зарегистр. 13.04.2021. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45822767> / (дата обращения 15.09.2021).
17. Крамынина Г.Н., Шолохов И.К. Анализ технологии RPA в автоматизации процессов на предприятии // Высокие технологии, наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации : сб. ст. IX Всерос. науч.-практ. конф. Пенза, 2021. С. 58–60.

18. Усенко Р.С., Кривцова С.С. Технология RPA и этапы ее жизненного цикла // Тенденции развития интернет и цифровой экономики : тр. IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Симферополь, 2021. С. 179–180.
19. Таули. Роботизированная автоматизация процессов: руководство к внедрению RPA систем. Монровия : Apress, 2020. 333 с.
20. The UiPath Studio Guide // UiPathDocumentation. URL: <https://studio.uipath.com/> (дата обращения 24.08.2021).
21. Стратегия цифровой трансформации ОАО «РЖД» до 2025 г. : утв. советом директоров ОАО «РЖД» 25.10.2019 г. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локал. сети (дата обращения 01.10.2021).
22. UN DESA. United Nations Department of Economic and Social Affairs : site. URL: <https://www.un.org/en/desa> (access date: 24.07.2021).
23. О системе управления реализаций национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации : постановление Правительства РФ от 02.03.2019 № 234 (в ред. от 21.08.2020). Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локал. сети (дата обращения 01.10.2021).
24. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года : указ Президента Рос. Федерации от 21.07.2020 г. № 74 // Президент России : официал. портал. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45726> (дата обращения 18.07.2021).

### References

1. Polozheniye o sisteme vedeniya putevogo khozyaistva OAO «RZHD» [Regulations on the system of track management of JSC "Russian Railways"]. Approved by the order of JSC «Russian Railways» dated 31.12.2015 No. 3212r. Code: website. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556494188?marker=6520IM> (accessed June 20, 2021).
2. Instruktsiya o poryadke planirovaniya, razrabotki, predostavleniya i ispol'zovaniya tekhnologicheskikh «okon» dlya remontnykh i stroitel'no-montazhnykh rabot v OAO «RZHD» [Instructions on the procedure for planning, developing, providing and using technological «windows» for repair and construction and installation works in JSC «Russian Railways】. Approved by the order of JSC «Russian Railways» dated 25.02.2019 No. 348/r. Consultant Plus: website. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/> (accessed August 28, 2021).
3. Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii [Rules of technical operation of railways of the Russian Federation]. Approved by the order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 21.12.2010 No 286. Labor landing: website. URL: <https://www.tdesant.ru/> (accessed September 18, 2021).
4. Instruktsiya po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov pri proizvodstve putevykh rabot [Instructions for ensuring the safety of train traffic during track work]. Approved by the Order of JSC «Russian Railways» dated 29.12.2012 No 2540r. Code: website. URL: <https://docs.cntd.ru/document/> (accessed April 23, 2021).
5. Tekhnicheskie usloviya na raboty po rekonstruktsii i remontu zheleznodorozhного puti [Technical conditions for the reconstruction and repair of the railway track]. Approved by the order of JSC «Russian Railways» dated 18.01.2013 No 75r. Code: website. URL: <https://docs.cntd.ru/document/> (accessed July 16, 2021).
6. Polozhenie o poryadke organizatsii ograzhdeniya mest proizvodstva rabot na ob"ektakh infrastruktury OAO «RZHD» pri vypolnenii tekhnologicheskogo protsessa [Regulation on the procedure for the organization of fencing of work sites at infrastructure facilities of JSC «Russian Railways» during the execution of the technological process]. Approved by the Order of JSC «Russian Railways» dated August 19, 2015 No. 2087r. Mool.com: website. URL: <https://mool.com/d/otraslevye-i-vedomstvennye-normativno-metodicheskie-dokumenty/proektirovaniye-i-stroitelstvo-zheleznykh-dorog/32138/> (accessed August 31, 2021).
7. Kolinichenko E.A. Organizatsiya propuska mobil'nykh sredstv defektoskopii na Vostochnom poligone [Organization of the passage of mobile means of flaw detection at the Eastern polygon]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2021, no 2(69), pp. 68-72.
8. Syslov O.A., Fedorova V.I. Perspektivnyye podkhody k prognoznomu modelirovaniyu degradatsionnykh protsessov elementov verkhnego stroeniya puti i ikh primenie pri sozdaniyu tsifrovyykh dvoinikov [Prospective approaches to predictive modeling of degradation processes of track superstructure elements and its application in creating digital twins] // *Vestnik VNIIZHT* [Bulletin of VNIIZHT]. 2021. 80 (5): pp. 251–259. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259>.
9. Tipovaya sistema upravleniya tekushchim soderzhaniem ob"ektor ekspluatatsionnoi infrastruktury (TS-2) (khozyajstvo puti). Poluchenie dopuska putevykh brigad k rabote. Operatsionnaya instruktsiya [A typical management system for the current maintenance of operational infrastructure facilities (TS-2) (track economy). Obtaining the admission of travel teams to work. Operating instructions]. OCRV, 2019. EC ASUI portal, 14 p.
10. Instruktsiya po tekushchemu soderzhaniyu zheleznodorozhного puti [Instructions on the current maintenance of the railway track]. Approved by the order of JSC «Russian Railways» dated 14.11.2016 No. 2288r. Code: website. URL: <https://docs.cntd.ru/document/> (accessed September 18, 2021).
11. Polozhenie ob organizatsii kompleksnogo obsluzhivaniya ob"ektor infrastruktury khozyaistva puti i sooruzhenii [Regulations on the organization of complex maintenance of infrastructure facilities of the track economy and structures]. Approved by the Order of JSC «Russian Railways» dated 29.11.2019 No. 2675r. Consultant Plus: website. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/> (accessed October 4, 2021).
12. Sivitskii D.A. Analiz opyta i perspektiv primeneniya iskusstvennykh neironnykh setey na zheleznodorozhnom transporte [Analysis of the experiences and perspectives of application of artificial neural networks in rail transport]. *Vestnik SGUPS* [Bulletin of Siberian State Transport University]. 2021, no 2 (57). P. 33-41. DOI: 10.52170/1815-9265\_2021\_57\_33.
13. Glubokov N.N., Mironenko E.V. Sistema «Elektronnoe putevoe khozyaistvo» [System «Electronic track management】. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State University of Railways], 2019, no 3, pp. 30-34.

14. Kompleksnaya programma innovatsionnogo razvitiya kholdinga «RZHD» [Comprehensive program of innovative development of the Russian Railways Holding]: electronic resource. Access mode: <https://zssd.rzd.ru/> (accessed September 1, 2021).
15. Programmnii robot dlya testirovaniya bazovykh funktsiy EK ASUI TSI i EK ASUI TS-2 (PR-GVTS-TSTS-INFR-002) [Software robot for functional testing of interaction between KASANT and EC ASUI KMO (PR-GVTS-CTS-INFR-010)]. Certificate of state registration of a computer program. Certificate number: RU 2021660510. Patent Office: Russia. Year of publication: 2021. [Electronic resource]. Access mode: <https://elibrary.ru/> (accessed 15.09.2021).
16. Programmnii robot dlya testirovaniya bazovykh funktsiy EK ASUI TSI i EK ASUI TS-2 (PR-GVTS-TSTS-INFR-002) [Software robot for testing the basic functions of EC ASUI TSI and EC ASUI TS-2 (PR-GVTS-CTS-INFR-002)]. Certificate of state registration of a computer program. Certificate number: RU 2021616595. Patent Office: Russia. Year of publication: 2021 [Electronic resource]. Access mode: <https://elibrary.ru/> (accessed September 16, 2021).
17. Kamynina G.N., Sholokhov I.K. Analiz tekhnologii RPA v avtomatizatsii protsessov na predpriyatiy [Analysis of RPA technology to automate processes in the enterprise]. *Sbornik statei IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Vysokie tekhnologii, nauka i obrazovanie: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii»* [Proceedings of the IX all-Russian scientific-practical conference «High technology, science and education: current issues, achievements and innovations»]. Penza: Science and Education, 2021. pp. 58–60.
18. Usenko R.S., Krivtsova S.S. Tekhnologiya RPA i etapy ee zhiznennogo tsikla [RPA technology and stages of its life cycle]. *Trudy IV Vserossiiskoy s mezhunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tendentsii razvitiya internet i tsifrovoi ekonomiki»* [Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Trends in the development of the Internet and digital economy»]. Simferopol: Krymskii Federal'nyi Universitet Publ., 2021, pp. 179–180.
19. Taulli. Robotizirovannaya avtomatizatsiya protsessov: rukovodstvo k vnedreniyu RPA sistem [Robotic process automation: A Guide to the implementation of RPA systems]. Monrovia: Apress, 2020. 333 p.
20. The UiPath Studio Guide [Electronic resource]. Access mode: <https://studio.uipath.com/> (accessed 24.08.2021).
21. Strategiya tsifrovoi transformatsii OAO «RZHD» do 2025 goda [Strategy of digital transformation of JSC «Russian Railways» until 2025]. Approved. by the Board of Directors of JSC «Russian Railways» on October 25, 2019. Consultant Plus: website. URL: <https://consultant.ru> (accessed October 1, 2021).
22. UN DESA (2021). United Nations Department of Economic and Social Affairs: website. URL: <https://www.un.org/en/desa> (accessed: July 24, 2021).
23. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 02.03.2019 N 234 (red. ot 21.08.2020) «O sisteme upravleniya realizatsiei natsional'noi programmy «Tsifrovaya ekonomika Rossiiskoi Federatsii» [Decree of the Government of the Russian Federation of 02.03.2019 N 234 (ed. of 21.08.2020) «On the management system for the implementation of the national program «Digital Economy of the Russian Federation»]. Consultant Plus: website. URL: [http://www.consultant.ru/](http://www.consultant.ru) (accessed October 1, 2021).
24. Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 21.07.2020 g. no 74 «O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda» [Decree of the President of the Russian Federation no 74 dated 21.07.2020 «On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030»]. Access mode: <http://www.kremlin.ru/acts/bank> / (accessed July 18, 2021).

### Информация об авторах

**Асальханова Татьяна Николаевна**, канд. экон. наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: asalk-tatyana@yandex.ru

**Карпов Иван Геннадьевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: igkarpov57@mail.ru

**Лагерев Сергей Юрьевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: lagerev.sergey@gmail.com

### Information about the authors

**Tatyana N. Asalkhanova**, Ph.D. in Economic Science, Associate Professor of Department «Path and track facilities», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: asalk-tatyana@yandex.ru

**Ivan G. Karpov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Department «Path and track facilities», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: igkarpov57@mail.ru

**Sergey Yu. Lagerev**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Department «Path and track facilities», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: lagerev.sergey@gmail.com

## Реконструкция участка железной дороги с целью увеличения скоростей движения поездов

Т. А. Дубровская, А. В. Тавтын✉

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

✉ tavtyn98@mail.ru

### Резюме

Освоение растущего грузооборота вызывает необходимость увеличения пропускной способности железнодорожных линий. Это увеличение, определяемое как разница между потребной и наличной пропускной способностью, может быть достигнуто за счет организационно-технических и реконструктивных мероприятий. К организационно-техническим относятся мероприятия, направленные на использование резервов пропускной способности и потому не требующие значительных расходов. В результате увеличиваются масса и скорость движения поездов, уменьшаются станционные интервалы, ускоряется обработка поездов и сокращается их стоянка на станциях. Реконструктивные мероприятия связаны с применением новой техники и выполнением строительных работ, что требует значительных капитальных затрат. Реконструкцию железных дорог проводят поэтапно в наиболее целесообразной последовательности, что позволяет снизить капитальные затраты и расходы на перевозки. Для обеспечения потребной пропускной способности железнодорожной линии выбирают наиболее рациональные организационно-технические и реконструктивные мероприятия на основе технико-экономического сравнения вариантов. При разработке проекта реконструкции существующей железной дороги решают следующие задачи: оптимизация положения трассы в плане и профиле; выбор элементов технического оснащения линии, в частности типа локомотива; назначение путей увеличения провозной способности железной дороги. Для того чтобы решить эти и другие задачи проектирования железных дорог, используются алгоритмические методы, позволяющие определить массу поезда при известном продольном профиле и заданном локомотиве, скорость движения и время хода поезда, расход электрической энергии при электрической тяге или дизельного топлива при тепловозной тяге. Такие методы объединяются общим названием – тяговые расчеты, которые базируются на общих положениях науки о тяге поездов.

### Ключевые слова

железная дорога, реконструкция железной дороги, пропускная и провозная способности дороги, железнодорожные перевозки, организационно-технические мероприятия, реконструктивные мероприятия, тяговые расчеты

### Для цитирования

Дубровская Т. А. Реконструкция участка железной дороги с целью увеличения скоростей движения поездов / Т. А. Дубровская, А. В. Тавтын // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 64–74. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).64-74

### Информация о статье

поступила в редакцию: 17.01.2022 г.; поступила после рецензирования: 24.03.2022 г.; принята к публикации: 25.03.2022 г.

## Reconstruction of a section of the railway in order to increase the speed of trains

Т. А. Dubrovskaya, А. В. Tavtyn✉

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

✉ tavtyn98@mail.ru

### Abstract

The development of the growing freight turnover necessitates an increase in the carrying capacity of railway lines. Defined as the difference between the required and available carrying capacity, this can be achieved through organizational, technical and reconstruction measures. Organizational and technical measures include those aimed at using the reserves of carrying capacity and therefore not requiring significant costs. As a result, the mass and speed of train movement increases, station intervals decrease, the processing of trains is accelerated with their parking time at stations is reduced. Reconstruction activities are associated with the use of new equipment and construction work, which requires significant capital expenditures. Reconstruction of railways is carried out by stages in the most appropriate order, which reduces capital and transportation costs. To ensure the required throughput of the railway line, the most rational organizational, technical and reconstruction measures are selected on the basis of a technical and economic comparison of options. When developing a project design for the reconstruction of an existing railway, the following tasks are solved: optimization of the route position in plan and profile; choice of the technical equipment elements of the line, in particular; outlining the ways to increase the carrying capacity of the railway. In order to solve

these and other problems of the design of railways, algorithmic methods are used to determine the mass of a train with a known longitudinal profile and a given locomotive, the speed and travel time of the train, the consumption of electrical energy for electric traction or diesel fuel for diesel traction. Such methods are called by general name of traction calculations, which are based on the general provisions of the train traction science.

## Keywords

railway, railway reconstruction, capacity and carrying capacity of the road, railway transportation, organizational and technical measures, reconstructive measures, traction calculations

## For citation

Dubrovskaya T. A., Tavtyn A. V. Rekonstruktsiya uchastka zheleznoi dorogi s tsel'yu uvelicheniya skorosti dvizheniya poездов [Reconstruction of a section of the railway in order to increase the speed of trains]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 64–74. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).64-74

## Article Info

Received: 17.01.2022; revised: 24.03.2022; accepted: 25.03.2022.

## Введение

Реконструкцию железных дорог проводят поэтапно в наиболее целесообразной последовательности, что позволяет снизить капитальные затраты и расходы на перевозки. Для обеспечения потребной пропускной способности железнодорожной линии выбирают наиболее рациональные организационно-технические и реконструктивные мероприятия на основе технико-экономического сравнения вариантов [1].

Республика Беларусь благодаря своему географическому расположению является неотъемлемым звеном в грузовых перевозках по маршруту Китай – Европа – Китай. В последние годы на Белорусской железной дороге прилагаются большие усилия для ее модернизации и обновления тягового подвижного состава, что повышает уровень организации перевозок и их эффективность и, соответственно, способствует значительному увеличению объема транзитных перевозок [2].

Растущие объемы перевозок требуют постоянного увеличения пропускной и провозной способностей дороги. Загрузка основных направлений от общей протяженности дорог, отсутствие делений на основные специализации линий, отсутствие ряда электрифицированных участков, сезонная неравномерность перевозок – все это снижает пропускную и провозную способности Белорусской железной дороги.

В Беларуси провозная способность является главным показателем производительности железной дороги [3]. Увеличить провозную способность по грузовому движению можно двумя путями: повысить массу состава поезда или пропускную способность дороги. Число перевозимых пассажиров можно увеличить,

добавив количество вагонов в поездах или повысив скорость движения.

Вообще нет однозначного понятия пропускной и провозной способностей [4]. В Германии пропускная способность есть ни что иное как возможность участка пропускать количество поездов за единицу времени [5]. В Дании это уже способность инфраструктуры пропускать определенное количество поездов при соблюдении графика движения [6].

Мероприятия по увеличению пропускной и провозной способностей тесно связаны с усилением мощности железных дорог и подразделяются на организационно-технические и реконструктивные мероприятия (рис. 1) [7].

Реконструктивные мероприятия наиболее дорогой вариант усиления мощности дороги. К ним можно отнести строительство дополнительных путей (второй, третий т. д.), электрификацию, удлинение приемоотправочных путей, строительство двухпутных вставок и т.д.

Увеличение пропускной и провозной способностей с помощью организационно-технических мероприятий – не такой затратный вариант, как реконструкция, и состоит в том, чтобы использовать внутренние ресурсы существующей железнодорожной линии: сокращение или отмену стоянок, изменение размера тяговых плеч [8]. В результате таких мероприятий увеличиваются скорость движения поездов, уменьшаются станционные интервалы, ускоряется обработка поездов и сокращается их стоянка на станциях.

Все это позволяет усилить линию за счет более эффективного использования технических устройств без значительных капитальных вложений и за сравнительно короткий срок.



**Рис. 1. Мероприятия по увеличению наличной пропускной способности**  
**Fig.1. Measures to increase the existing carrying capacity**

Для этого требуется больше затрачиваемых ресурсов, однако их использование позволяет резко увеличить количество пропускаемых поездов за сутки [9].

Целью данной статьи является оптимизация профиля пути на участке Белорусской железной дороги с помощью тяговых расчетов.

### Пути увеличения пропускной и провозной способностей

При разработке реконструктивных мер по увеличению пропускной и провозной способностей существующей железной дороги решаются следующие задачи:

- оптимизация положения трассы в плане и профиле;
- выбор элементов технического оснащения линии, в частности тип локомотива;
- назначение путей увеличения провозной и пропускной способностей железной дороги [1].

Оптимизация положения пути в плане заключается в реконструкции плана линии с увеличением радиусов криволинейных участков пути, так как кривые малых радиусов сдерживают скорости движения поездов. Однако не всегда есть возможность это выполнить, так как существующие пути и развитая инфраструкту-

ра в данном случае препятствует этому мероприятию.

Для увеличения скоростей движения, а, следовательно, и пропускной способности поездов допускаемая разность уклонов ( $\Delta i$ ) в профиле не должна превышать 6 % ( $\Delta i \leq 6 \%$ ) [10]. Если разность уклонов превышает нормативное значение, этот уклон спрямляется и проводится проверка путем тягового расчета, только после этого на участке проводится реконструкция пути.

Тип локомотива играет не последнюю роль в решении задачи по увеличению пропускной и провозной способностей дороги.

Эксплуатация мощных локомотивов позволила формировать поезда с увеличением их среднего веса и длины, что создает предпосылки для снижения себестоимости перевозок и повышения интереса к ним у грузовладельцев, особенно в сфере транзитных контейнерных перевозок [11].

Задействованные на важнейших направлениях перевозок современные электропоезда стали воплощением инновационных решений, призванных вывести Белорусскую стальную магистраль на новый уровень развития [12].

На железных дорогах Беларуси применяются тепловозная и электрическая тяги. При этом наибольшее распространение получили

электровозы переменного тока и тепловозы с электрической передачей (тяговыми электродвигателями) [13].

Важным шагом по обновлению парка грузовых локомотивов является приобретение Белорусской железной дорогой электровозов переменного тока БКГ1 и БКГ2, производимых компанией CRRC Datong Co., Ltd. (Китай) (рис. 2) [2].



**Рис. 2.** Электровоз БКГ1-012

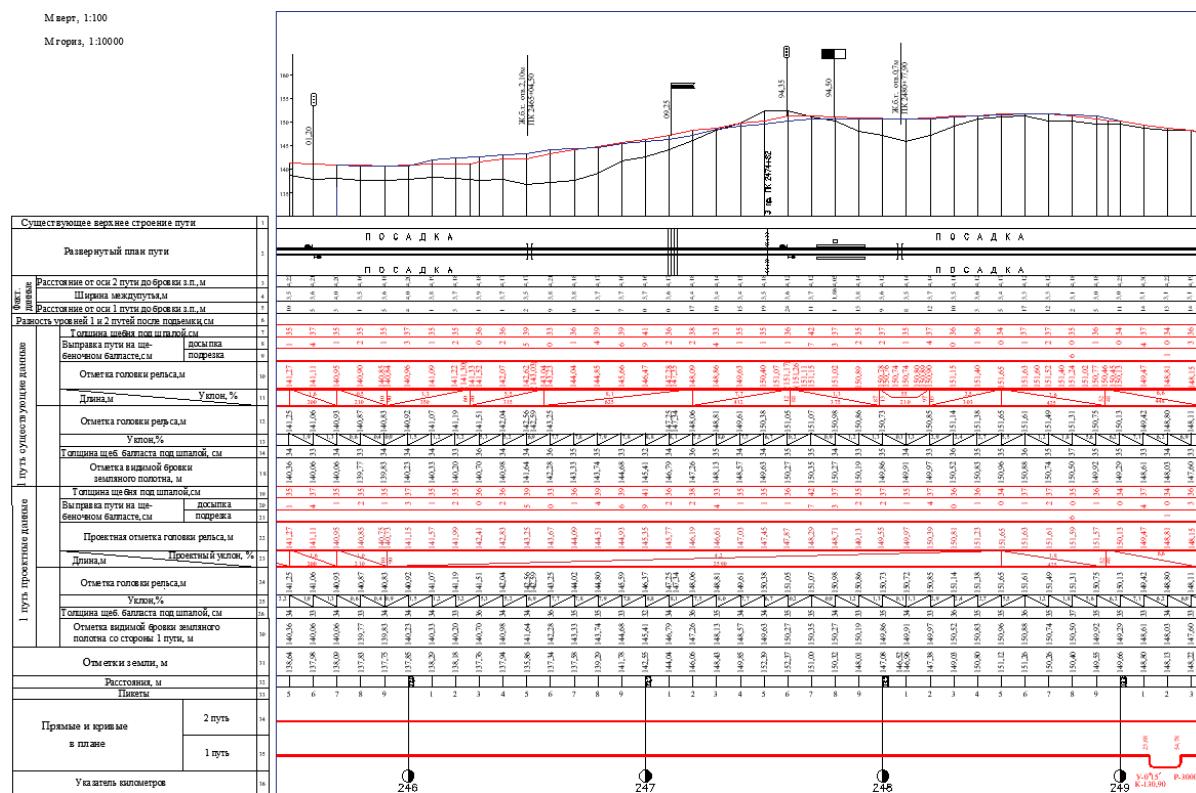
Электровозы были разработаны с учётом особенностей эксплуатации на территории Республики Беларусь. Для электровоза БКГ1 в марте 2013 г был получен сертификат Нацио-

нальной системы подтверждения соответствия Республики Беларусь, а в июне 2017 г. для электровоза БКГ2 получен сертификат Евразийского экономического союза ЕАС. В электровозах БКГ1 и БКГ2 75 % оборудования является взаимозаменяемым, что снижает затраты на их обслуживание и ремонт [2]. Заявленная мощность локомотива – 9 000 т.

Для назначения путей увеличения провозной способности железной дороги производится анализ участка, затем принимается окончательный вариант мероприятий, позволяющих увеличить пропускную и провозную способности дороги.

Для реализации повышения пропускной и провозной способностей применяется программный комплекс «ЭРА» (интегрированная система расчетов и анализа движения поездов, созданная в Дальневосточном государственном университете путей сообщения в 2010 г. В.А. Анисимовым и В.В. Анисимовым), позволяющий рассчитать массу состава, время хода и скорость.

На Белорусской железной дороге используются классические тяговые расчеты, дающие возможность анализировать все необходимые мероприятия для выбора окончательного варианта по повышению пропускной способности участка.



**Рис. 3.** Реконструируемый продольный профиль для грузового состава  
**Fig.3.** Freight train longitudinal profile under reconstruction

М.верг, 1:100

М.гориз, 1:10000

Существующее верхнее строение пути	
Развернутый план пути	
Расстояние от оси 2 пути до бровки зп.м	
Ширина междупутья, м	
Расстояние от оси 1 пути до бровки зп.м	
Разность уклонов 1 и 2 путей после подъемника, %	
Толщина шебяя под шпалой, см	
Выправка пути на щебеночном балласте, см	
Выправка пути на щебеночном балласте, см	
Отметка головки рельсов	
Длина, м	
Уклоны, %	
Отметка головки рельсов	
Уклоны, %	
Толщина щебяя под шпалой, см	
Отметка видимой бровки земляного полотна, м	
Толщина щебяя под шпалой, см	
Выправка пути на щебеночном балласте, см	
Выправка пути на щебеночном балласте, см	
Проектная отметка головки рельсов	
Длина, м	
Проектный уклоны, %	
Отметка головки рельсов	
Уклоны, %	
Толщина щебяя под шпалой, см	
Отметка видимой бровки земляного полотна со стороны 1 пути, м	
Отметки земли, м	
Расстояния, м	
Пикеты	
Прямые и кривые в плане	2 путь
	1 путь
Указатель километров	

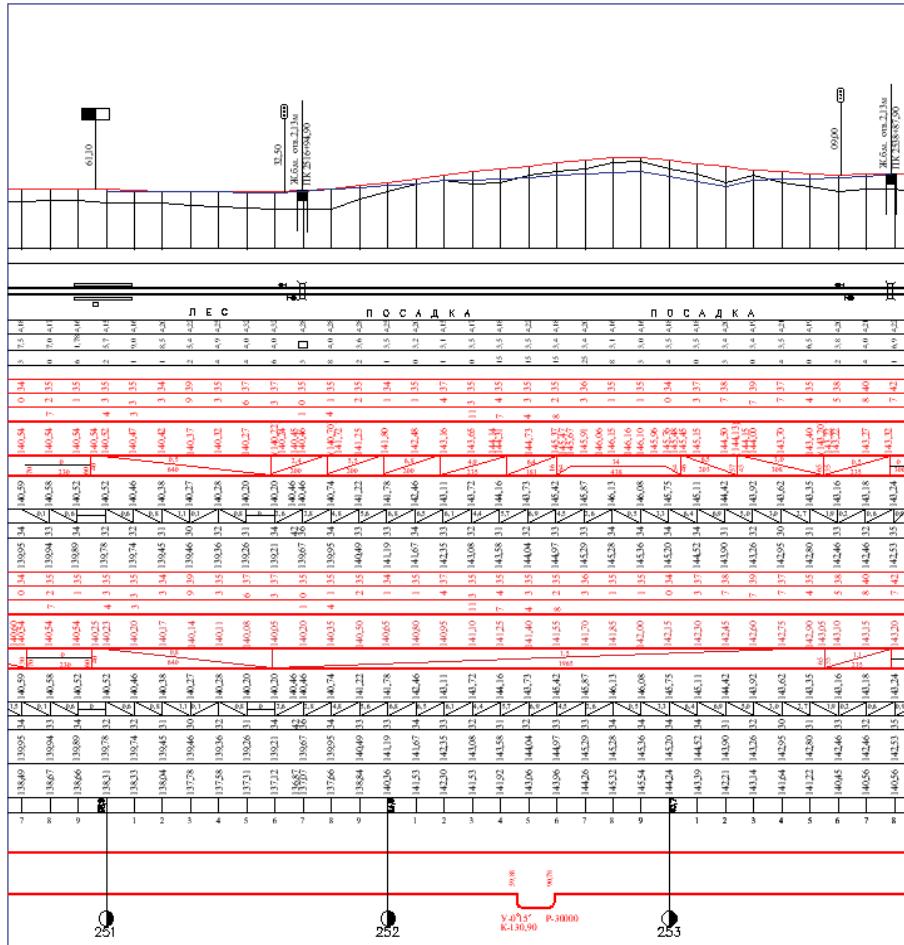


Рис. 4. Реконструируемый продольный профиль для пассажирского состава  
Fig.4. Passenger train longitudinal profile under reconstruction

### Пример расчета на участке железной дороги

Для оценки назначенных мероприятий по увеличению пропускной и провозной способностей железной дороги [14] рассмотрим участок Белорусской железной дороги (ПК246–ПК260) с разрешенной скоростью движения 140/80 км/ч [15].

Разность уклонов продольного профиля пути практически на всех пикетах (за исключением ПК247+60,00 и ПК252+80,00) соответствует современным нормативным требованиям ( $\Delta i \leq 6\%$ ). На ПК247+60,00  $\Delta i = 9\%$ , а на ПК252+80,00  $\Delta i = 12,9\%$ , что больше нормативного значения, т. е. на направлении существуют участки профиля, которые будут ограничивать скорости, а значит и пропускную способность. Данные интервалы нуждаются в перепроектировании с помощью более пологих уклонов (ПК247+60,00 и соседние участки уложили уклоном 4,2 %; ПК252+80,00 и соседние участки – 1,5 %) (рис.3, 4). Рисунки сущ-

твующего и реконструируемого профиля выполнены с помощью двухмерной системы автоматизированного проектирования AutoCAD.

После этого на всем участке разность соседних уклонов соответствует нормативным требованиям ( $\Delta i \leq 6\%$ ). Проверим с помощью тяговых расчетов, можно ли на данном участке повысить скорости движения пассажирских поездов до 160 км/ч, а грузовых – до 100 км/ч. Это можно сделать, применив новые типы локомотивов БКГ1-012 для грузового движения и электропоезда серии ЭП<sup>М</sup> (Stadler) для пассажирского движения.

Проверим возможность увеличения провозной способности грузового подвижного состава с помощью тяговых расчетов [16].

Исходные данные: локомотив БКГ1-012; масса локомотива  $P=200$  т; масса состава с платформами 13-491 3500 т; длина поезда  $\approx 680$  м; ускорение свободного падения  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>; средняя нагрузка на ось груженного вагона  $q_{04}$

= 25,0 т; конструкционная скорость – 120 км/ч; сила тяги при трогании:  $F_{\text{к тр}} = 774980 \text{ Н}$ ; спрятанный максимальный уклон:  $i_c = (1,5 \cdot 113,65 + 0,285 + 0,280) / 680 = 0,25\%$ ; радиус кривой:  $R = 20000 \text{ м}$ ; длина кривой:  $S_{\text{кр}} = 133,81 \text{ м}$ .

*Определение силы тяги при  $V_p = 100 \text{ км/ч}$*

Касательная сила тяги электровоза при скорости 100 км/ч определяется по формуле:

$$F_{\text{кр}} = g (367\eta N) / V_p.$$

где  $\eta$  – коэффициент приближения реальной тяговой характеристики к идеальной (0,70);  $N$  – мощность локомотива,  $N^{\text{БКГ-1}} = 2 \cdot 4800 \text{ кВт}$ ;  $F_{\text{кр}} = 9,81(367 \cdot 0,7 \cdot 9600) / 100 = 241938 \text{ Н}$ .

*Определение массы состава по подъему на железнодорожном пути при  $V_p = 100 \text{ км/ч}$*

Масса состава определяется по формуле:

$$Q = (F_{\text{кр}} - P(w'_0 + i_p)) / (w''_0 + i_p) \quad (1)$$

где  $w'_0$  – основное удельное сопротивление локомотива, Н/т;  $w''_0$  – основное удельное сопротивление состава, Н/т.

Основное удельное сопротивление движению грузовых вагонов в груженом состоянии определяется по формуле:

$$\begin{aligned} w''_0 &= 0,7 + (3 + 0,1v + 0,0025v^2) / q_{04}. \\ w''_0 &= 0,7 + (3 + 0,1 \cdot 100 + 0,0025 \cdot 100^2) / 25,0 = \\ &= 2,22 \text{ Н/т.} \end{aligned}$$

Основное удельное сопротивление движению локомотиву определяется по формуле:

$$w'_0 = 1,9 + 0,008v + 0,00025v^2.$$

$$w'_0 = 1,9 + 0,008 \cdot 100 + 0,00025 \cdot 100^2 = 5,2 \text{ Н/т.}$$

Основное удельное сопротивление движению поезда определяется как средневзвешенное для локомотива и состава (вагонов) по формуле:

$$w_0 = (w'_0 P + w''_0 Q) / (P + Q).$$

$$\begin{aligned} w_0 &= (5,2 \cdot 200 + 2,22 \cdot 3500) / (200 + 3500) = 2,38 \\ &\text{Н/т.} \end{aligned}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда по кривой:

$$w_{\text{р0}} = g((700S_{\text{кр}}) / RL_{\text{по}}) k_s.$$

где  $R$  – радиус кривой, м;  $S_{\text{кр}}$  – длина кривой, м;  $L_{\text{по}}$  – длина поезда, м;  $k_s$  – коэффициент на сопротивление тележек экипажей.

$$\begin{aligned} w_{\text{р0}} &= 9,81 \cdot ((700 \cdot 133,81) / 20000 \cdot 680) \cdot 1,1 = 0,07 \\ &\text{Н/т.} \end{aligned}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда при низкой температуре наружного воздуха (учитывается при температуре наружного воздуха ниже 10°C) определяется по формуле:

$$w_{\text{HT}} = k_{\text{HT}} w_0,$$

где  $k_{\text{HT}}$  – коэффициент, принимаемый при абсолютной минимальной температуре воздуха (-38°C) [13],  $k_{\text{HT}} = 0,008$ .

$$w_{\text{HT}} = 0,008 \cdot 2,38 = 0,019 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда от встречного и бокового ветра определяется по формуле:

$$w_{\text{B}} = k_{\text{B}} w_0,$$

где  $k_{\text{B}}$  – коэффициент в зависимости от скорости ветра (15 м/с) и скорости поезда,  $k_{\text{B}} = 0,425$ .

$$w_{\text{B}} = 0,425 \cdot 2,38 = 1,01 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда вагонами вперед:

$$w_{\text{BB}} = (0,15 + i_c / 1000) w_0,$$

$$w_{\text{BB}} = (0,15 + 4,2 / 1000) 2,38 = 0,37 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда в зависимости от состояния пути определяется по формуле:

$$w_{\text{cp}} = (k_{\text{cp}} - 1) w_0.$$

где  $k_{\text{cp}}$  – коэффициент зависит от характеристики пути,  $k_{\text{cp}} = 1,0$ .

$$w_{\text{cp}} = (1,0 - 1) \cdot 2,38 = 0 \text{ Н/т.}$$

Уклон с учетом всех дополнительных сопротивлений:

$$i = g i_c + w_{\text{r0}} + w_{\text{HT}} + w_{\text{B}} + w_{\text{BB}} + w_{\text{cp}}.$$

$$\begin{aligned} i_p &= 9,81 \cdot 4,2 + 0,07 + 0,019 + 1,01 + 0,37 + 0 = \\ &= 42,58 \text{ Н/т.} \end{aligned}$$

Таким образом, масса состава в соответствии с (1):

$$\begin{aligned} Q &= (241938 - 200 \cdot (5,2 + 42,58)) / (2,22 + 42,58) \\ &= 5187 \text{ т} \approx 5200 \text{ т.} \end{aligned}$$

Таким образом, масса состава для подачи на реконструируемый железнодорожный путь для поездов, ведомых локомотивом БКГ1-012 при движении на подъем  $i_c = 4,2\%$  со скоростью 100 км/ч составит 5200 т, что больше массы состава, состоящего из 35 платформ 13-491 ( $35 \cdot 100 + 200 = 3700$  т). Проверяем полученное значение массы состава на трогание с места.

*Проверка массы состава при трогании с места для четырехосной платформы 13-491.*

Масса состава, состоящего из платформ:

$$Q^{\text{бар.}} = n^{\text{бар.}} \cdot q^{\text{бар.}}, \quad (2)$$

где  $n^{\text{бар.}}$  – количество платформ в составе, шт.;  $q^{\text{бар.}}$  – масса брутто ( $q^{\text{бар.}} = 100$  т), т.

Массу составов определяем по формулам (1) и получаем для вагонов:

$$Q^{\text{бар.}} = 35 \cdot 100 = 3500 \text{ т.}$$

Рассчитанная по формуле (2) масса грузового состава проверяется на трогание с места на остановочных пунктах по формуле:

$$Q_{\text{тр}} = F_{\text{к тр}} / (w_{\text{тр}} + i_{\text{тр}}) - P, \quad (3)$$

где  $F_{\text{к тр}}$  – касательная сила тяги при трогании с места, Н;  $w_{\text{тр}}$  – удельное сопротивление состава при трогании с места, Н/т;  $i_{\text{тр}}$  – уклон участка пути, на котором происходит трогание, %;  $P$  – расчетная масса локомотива, т.

Масса состава, рассчитанная по формуле (2), должна быть меньше массы состава, полученной по формуле (3), т.е.  $Q^{\text{бар}} < Q_{\text{тр}}$ .

Проверка массы состава при трогании с места будет определяться для электровоза БКГ1-012. В тяговых расчетах для определения массы состава силу тяги электровозов следует принимать на 7 % меньше расчетной. Касательная сила тяги при трогании с места определяется как

$$F_{\text{к тр}} = 774\,980 \cdot 0,93 = 720731 \text{ Н.}$$

Удельное сопротивление состава при трогании с места на площадке [17] для вагонов определяется по формуле:

$$w^{\text{бар}}_{\text{тр}} = 28 / (q^{\text{бар}}_0 + 7), \quad (4)$$

где  $q^{\text{бар}}_0$  – масса, приходящаяся на ось колесной пары полувагона (т), –

$$q^{\text{бар}}_0 = q^{\text{бар}} / k^{\text{бар}}, \quad (5)$$

где  $k^{\text{бар}}$  – количество осей платформы (для полуваагона  $k^{\text{бар}} = 4$ ).

По формуле (5) получаем:

$$q^{\text{бар}}_0 = 100/4 = 25,0 \text{ т.}$$

Определяем удельное сопротивление состава при трогании с места по формуле (4) получаем для платформы:

$$w^{\text{бар}}_{\text{тр}} = 28 / (25,0 + 7) = 0,88 \text{ Н/т.}$$

Уклон участка пути, на котором происходит трогание с места ( $i_{\text{тр}}$ ) определяем подбором, и он равняется  $i_c = 0 \%$ .

Расчетная масса локомотива составляет для БКГ1-012  $P = 200$  т.

По формуле (3) проверяем массу грузового состава, состоящего из платформ на трогание для тепловоза БКГ1-012:

$Q^{\text{бар}}_{\text{тр}} = 720731 / ((0,88 + 4,2) \cdot 9,81) - 200 = 14262$  т. Выполним сравнение масс грузовых составов из платформ с установленной нормой массы составов ( $Q^{\text{бар}} < Q^{\text{бар}}_{\text{тр}}$ ):

БКГ1-012 – 5200 < 14262 – выполняется.

Итак, трогание с места при уклоне 4,2 % возможно осуществить локомотивом БКГ1-012.

*Расчет условия удержания поездов вспомогательными тормозами локомотивов*

Тормозную силу локомотива при удержании поезда на станции, имеющей спуск, вспомогательным тормозом локомотива определяется как:

$$B_{\text{T}} = 0,25 \cdot \Sigma K_{\text{P}} g,$$

где,  $\Sigma K_{\text{P}}$  – сумма расчетных сил нажатия тормозных колодок  $K_{\text{P}}$  (при груженом режиме  $K_{\text{P}}$  равняется 18,0 на одну ось для БКГ1-012), кН.

Получаем:

$$B_{\text{T}} = 0,25 \cdot (4 \cdot 18) \cdot 9,81 = 176,58 \text{ кН.}$$

Для выполнения условия удержания поездов тормозная сила локомотива должна быть больше дополнительного сопротивления от уклона, т.е. необходимо выполнение следующего условия:

$$B_{\text{T}} > w_i, \quad (6)$$

где  $w_i$  – дополнительное сопротивление от уклона (тс), определяемое по формуле:

$$w_i = (P + Q) \cdot g \cdot i_{\text{тр}}. \quad (7)$$

По формуле (7) определяем дополнительное сопротивление грузового состава, состоящего из платформ для электровоза БКГ1-012:

$$w_i = (200 + 3 \cdot 500) \cdot 9,81 \cdot 0,0042 = 152,45 \text{ кН.}$$

Выполним сравнение с формулой (6) для грузовых составов:

$$176,58 > 152,42 \text{ – выполняется.}$$

Таким образом, при уклоне 2,5 % поезд возможно удержать на станции, имеющей спуск, только вспомогательным тормозом локомотива.

Из приведенных расчетов можно сделать следующий вывод: при переустройстве ПК 247+60 и прилегающих к нему участков на соответствие разности уклонов нормативным требованиям ( $\Delta i \leq 6 \%$ ) применение грузового локомотива БКГ1-012 позволяет реализовывать скорости 100 км/ч.

При расчете была выбрана платформа 13-491, так как она самая длинная и масса брутто наибольшая, из проходящих на данном участке.

Исходные данные: локомотив – ЭП<sup>М</sup> (рис.5); масса моторного вагона  $P = 40$  т; масса пассажирских вагонов (средний вес человека принят 80 кг)  $Q = 230 + 0,080 \cdot 382 = 260,6$  т; длина поезда –  $L_{\text{п}} = 134,54$  м; ускорение свободного падения  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ; средняя нагрузка на ось пассажирского вагона  $q_0 = 33,75$  т; конструкционная скорость локомотива 200 км/ч; сила тяги при трогании  $F_{\text{к тр}} = 294 \cdot 200$  Н; спрямленный максимальный уклон  $i_c =$

$(1,5 \cdot 113,65) / 134,54 = 1,27$ ; радиус кривой  $R = 20000$  м; длина кривой  $S_{kp} = 133,81$  м.



Рис. 5. Электропоезд ЭП<sup>м</sup>  
Fig.5. Electric Train EP<sup>m</sup>

Определение силы тяги при  $V_p = 160$  км/ч

Касательная сила тяги электровоза при скорости 160 км/ч определяется по формуле:

$$F_{kp} = g (367\eta N) / V_p.$$

где  $\eta$  – коэффициент приближения реальной тяговой характеристики электровоза к идеальной, (0,70);  $N$  – мощность локомотива,  $N^{EPm} = 3900$  кВт;

$$F_{kp} = 9,81 \cdot (367 \cdot 0,7 \cdot 3900) / 160 = 61\,430 \text{ Н.}$$

Определение массы состава по подъему при  $V_p = 160$  км/ч

Масса состава определяется по формуле:

$$Q = (F_{kp} - P(w'_0 + i_p)) / (w''_0 + i_p),$$

где  $w'_0$  – основное удельное сопротивление локомотива, Н/т;  $w''_0$  – основное удельное сопротивление состава, Н/т.

Основное удельное сопротивление движению [18] с пассажирами определяется как:

$$w''_0 = 0,7 + (3 + 0,1v + 0,0025v^2) / q_0.$$

$$w''_0 = 0,7 + (3 + 0,1 \cdot 160 + 0,0025 \cdot 160^2) / 33,75 = 3,16 \text{ Н/т.}$$

Основное удельное сопротивление движению электровоза под током определяется:

$$w'_0 = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2.$$

$$w'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot 160 + 0,0003 \cdot 160^2 = 11,18 \text{ Н/т.}$$

Основное удельное сопротивление движению поезда определяется как средневзвешенное для локомотива и состава (вагонов) по формуле:

$$w_0 = (w'_0 P + w''_0 Q) / (P + Q).$$

$$w_0 = (11,18 \cdot 40 + 3,16 \cdot 260,6) / (40 + 260,6) = 4,22 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда по кривой:

$$w_{r0} = g((700S_{kp}) / RL_n) k_s,$$

где  $R$  – радиус кривой, м;  $S_{kp}$  – длина кривой, м;  $L_n$  – длина поезда, м;  $k_s$  – коэффициент на сопротивление тележек экипажей, 1,1 –

$$w_{r0} = 9,81 \cdot ((700 \cdot 133,81) / (20000 \cdot 134,54) \cdot 1,1 = 0,38 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда при низкой температуре наружного воздуха (учитывается при температуре наружного воздуха ниже 10°C) определяется как

$$w_{ht} = k_{ht} w_0,$$

где  $k_{ht}$  – коэффициент, принимаемый при абсолютной минимальной температуре воздуха (-38°C), равный 0,008 [12] –

$$w_{ht} = 0,008 \cdot 4,22 = 0,034 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда от встречного и бокового ветра определяется по формуле:

$$w_b = k_b w_0,$$

где  $k_b$  – коэффициент, зависящий от скоростей ветра (15 м/с) и движения поезда,  $k_b = 0,425$  [12].

$$w_b = 0,425 \cdot 4,22 = 1,79 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда вагонами вперед

$$w_{bb} = (0,15 + i_p / 1000) w_0,$$

$$w_{bb} = (0,15 + 1,5 / 1000) \cdot 4,22 = 0,64 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда в зависимости от состояния пути определяется по формуле:

$$w_{cp} = (k_{cp} - 1) w_0,$$

где  $k_{cp}$  – коэффициент, зависящий от характеристики пути,  $k_{cp} = 1,0$  –

$$w_{cp} = (1,0 - 1,0) \cdot 4,22 = 0 \text{ Н/т.}$$

Уклон с учетом всех дополнительных сопротивлений:

$$i = g i_c + w_{r0} + w_{ht} + w_b + w_{bb} + w_{cp}.$$

$$i_p = 9,81 \cdot 1,5 + 0,38 + 0,034 + 1,79 + 0,64 = 17,56 \text{ Н/т.}$$

Таким образом масса состава:

$$Q = (61430 - 40 \cdot (11,18 + 17,56)) / (3,16 + 17,56) \approx 2909 \text{ т.}$$

В итоге, масса состава для подачи на проектируемый железнодорожный путь для электропоезда ЭП<sup>м</sup> при движении на подъем  $i_c = 1,5\%$  со скоростью 160 км/ч составит 2 909 т, что больше состава с 382 пассажирами массой 260,6 т.

Проверка массы состава при трогании с места электропоезда ЭП<sup>м</sup>

Масса пассажирских вагонов с людьми:

$$Q_{\text{ваг.}} = n_{\text{чел.}} \cdot q_{\text{чел.}} + P_{\text{ваг.}} \quad (8)$$

где  $n_{\text{ваг.}}$  – количество человек, чел.;  $q_{\text{чел.}}$  – масса человека ( $q_{\text{чел.}} = 0,08$ ), т;  $P_{\text{ваг.}}$  – масса пассажирских вагонов (т) –

$$Q_{\text{ваг.}} = 382 \cdot 0,08 + 230 = 261 \text{ т.}$$

Рассчитанная по формуле (8) масса состава проверяется на трогание с места на остановочных пунктах по формуле:

$$Q_{\text{тр.}} = F_{\text{к тр.}} / (w_{\text{тр.}} + i_{\text{тр.}} \cdot g - P), \quad (9)$$

где  $F_{\text{к тр.}}$  – касательная сила тяги при трогании с места, кгс;  $w_{\text{тр.}}$  – удельное сопротивление состава при трогании с места, кгс/т;  $i_{\text{тр.}}$  – уклон участка пути, на котором происходит трогание, ‰;  $P$  – расчетная масса локомотива, т.

Масса состава в (8), должна быть меньше массы состава в (9), т.е.  $Q_{\text{ваг.}} < Q_{\text{тр.}}$ .

Проверка массы состава при трогании с места будет определяться для электровоза ЭП<sup>м</sup>.

В тяговых расчетах для определения массы состава силу тяги электровозов следует принимать на 7% меньше расчетной. Касательная сила тяги при трогании с места:

$$F_{\text{к тр.}} = 61\,430 \cdot 0,93 = 57\,130 \text{ Н.}$$

Удельное сопротивление состава при трогании с места на площадке для вагонов [17] определяется по формуле:

$$w_{\text{тр.}}^{\text{ваг.}} = 28 / (q_{\text{ваг.}}^{\text{ваг.}} + 7), \quad (10)$$

где  $q_{\text{ваг.}}^{\text{ваг.}}$  – масса, приходящаяся на ось колёсной пары пассажирского вагона, т:

$$q_{\text{ваг.}}^{\text{ваг.}} = q^{\text{ваг.}} / k_{\text{ваг.}}, \quad (11)$$

где  $k_{\text{ваг.}}$  – количество осей платформы, равное 2.

По формуле (11) получаем:

$$q_{\text{ваг.}}^{\text{ваг.}} = 77,14 / 2 = 38,57 \text{ т.}$$

Удельное сопротивление состава при трогании с места по формуле (10) для платформы:

$$w_{\text{тр.}}^{\text{ваг.}} = 28 / (38,57 + 7) = 0,61 \text{ Н/т.}$$

Уклон участка пути, на котором происходит трогание с места ( $i_{\text{тр.}}$ ) определяем подбором, и он равняется  $i_c = 1,5 \text{ ‰}$

Расчетная масса для ЭП<sup>м</sup>  $P = 40$  т.

По формуле (9) проверяем массу состава из 7-ми вагонов на трогание для электровоза ЭП<sup>м</sup>:

$$Q_{\text{ваг.}}^{\text{ваг.}} = 57130 / (0,61 + 1,5) \cdot 9,81 - 40 = 2720 \text{ т.}$$

Выполним сравнение масс грузовых составов из платформ с установленной нормой массы составов ( $Q_{\text{ваг.}}^{\text{ваг.}} < Q_{\text{ваг.}}^{\text{ваг.}}_{\text{тр.}}$ ):

ЭП<sup>м</sup> – 261 < 2720 – выполняется.

Таким образом, трогание с места при уклоне 1,5 ‰ возможно осуществить электровозом ЭП<sup>м</sup>.

**Расчет условия удержания поездов вспомогательными тормозами локомотивов**

Тормозную силу локомотива при удержании поезда на станции, имеющей спуск, вспомогательным тормозом локомотива, определяют как:

$$B_{\text{T}} = 0,25 \cdot \Sigma K_{\text{P}},$$

где  $\Sigma K_{\text{P}}$  – сумма приведенных сил нажатия тормозных колодок  $K_{\text{P}}$  (при груженом режиме  $K_{\text{P}}$  равняется 18,0 на одну ось для ЭП<sup>м</sup>), кН.

$$B_{\text{T}} = 0,25 \cdot (1 \cdot 18) \cdot 9,81 = 44,15 \text{ кН.}$$

Для выполнения условия удержания поездов тормозная сила локомотива должна быть больше дополнительного сопротивления от уклона, т.е. необходимо соблюдение неравенства:

$$B_{\text{T}} > w_i. \quad (12)$$

где  $w_i$  – дополнительное сопротивление от уклона (тс) определяется по формуле:

$$w_i = (P + Q) \cdot i_{\text{тр.}} \cdot g \quad (13)$$

По (13) определяем дополнительное сопротивление состава из 7-м вагонов для ЭП<sup>м</sup>:

$$w_{\text{ваг.}}^{\text{ваг.}} = (40 + 260,6) \cdot 0,0015 \cdot 9,81 = 4,4 \text{ кН.}$$

Выполним сравнение по (12) для грузовых составов:

$$45 > 4,4 – выполняется.$$

Таким образом, при уклоне 1,5 ‰ поезд возможно удержать на станции, имеющей спуск.

Из расчета следует, что при переустройстве ПК 252+80 и прилегающих к нему участков на соответствие разности уклонов нормативным требованиям ( $\Delta i \leq 6\%$ ) применение электропоезда ЭП<sup>м</sup> позволяет реализовывать скорости 160 км/ч.

## Заключение

Для увеличения пропускной и провозной способностей участка необходимо:

1. Изменить показатели профиля в местах, где разность уклонов превышает нормативное значение (ПК247+60,00 и ПК252+80,00). На ПК247+60,00 и соседних участках уклон уменьшен до 4,2 ‰, а на ПК252+80,00 и соседних участках уклон уменьшен до 1,5 ‰.

2. Для реализации повышения пропускной и провозной способностей предложено применение локомотивов БКГ-012 (для грузового движения) и ЭП<sup>м</sup> (Stadler) 01 (для пассажирского движения).

3. Тяговые расчеты, выполненные для данных локомотивов, показали реализацию более высоких скоростей движения грузовых и пассажирских поездов на перепроектированном участке, увеличив пропускную и провозную способности (примерно на 14 %).

4. Тяговые расчеты выполняются отдельно для переустраиваемых участков, так как скорость будет изменяться только в этих местах,

а на остальных участках между раздельными пунктами скорость движения останется практически неизменной.

Для окончательной оценки предложенных мероприятий и их внедрения выполняется полный тяговый расчет с построением кривой скорости на всем участке между раздельными пунктами.

### Список литературы

1. Аль-Арадж Модар. Обоснование повышения мощности железных дорог в ЕТС Сирийской Арабской Республики : дис. .... канд. техн. наук / Аль-Арадж Модар ; Петербург. гос. ун-т путей сообщ. СПб., 2000. 202 с.
2. Электровозы серии БКГ Белорусской железной дороги // Центр інформації транспорту України : сайт. URL : <https://railway-publish.com/articles-icut-magazine/articles-lokomotiv-inform/8319-elektrovozyi-serii-bkg-belorusskoy-zheleznoy-dorogi.html>. (Дата обращения: 27.12.2021).
3. Довгелюк Н.В., Ахраменко Г.В., Вербило В.А. Реконструкция железных дорог. БелГУТ, 2017. 339 с.
4. Браництов С.А., Ширванин А.М., Тумченок Д.А. Методы оценки пропускной способности железных дорог // Информационно-управляющие системы. 2014. № 5. С. 51–57.
5. Krueger H. Parametric Modeling in Rail Capacity Planning // Winter Simulation Conf. Piscataway. 1999. P. 1194–1200. DOI:org/10.1145/324898.325036
6. Kaas A. Methods to Calculate Capacity of Railways (Metoder Til Beregning af Jernbanekapacitet) : phd-thesis / Technical University of Denmark. Denmark, 1998. 182 р.
7. Ерофеев А.А., Ковтун П.В., Дубровская Т.А. Проблемы повышения скорости движения поездов на существующих железнодорожных линиях // Вестник БелГУТа. 2018. № 39. С. 57–60.
8. Увеличение пропускной способности // helpiks.org : сайт. URL: <https://helpiks.org/8-86807.html>. (Дата обращения: 19.12.2021).
9. Миронов В.С., Дубровская Т.А. Сфера эффективности скоростного пассажирского транспорта на железных дорогах // Транспортная инфраструктура сибирского региона : материалы Девятой междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. Т.1. С. 534–538.
10. СНБ 3.03.01-98. Железные дороги колеи 1520 мм. Минск : М-во архитектуры и строительства Республики Беларусь, 1998. 26 с.
11. Галай Э.И., Рудов П.К., Галай Е.Э. Исследование взаимодействия тормозных систем электровозов вл80, бкг1 и состава вагонов при вывode грузового поезда с перегона // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Гомель, 2018. С. 18–20.
12. Локомотивы развития // Железнодорожник Белоруссии : сайт. URL: <http://xpress.by/2018/11/21/lokomotivy-razvitiya/>. (Дата обращения: 24.12.2021).
13. Особенности локомотивного хозяйства в Республике Беларусь и мировой опыт ведения локомотивного хозяйства // studbooks.net : сайт. URL: [https://studbooks.net/2169698/ekonomika/osobennosti\\_lokomotivnogo\\_hozyaystva\\_respublike\\_belarus\\_mirovoy\\_opryt\\_vedeniya\\_lokomotivnogo\\_hozyaystva/](https://studbooks.net/2169698/ekonomika/osobennosti_lokomotivnogo_hozyaystva_respublike_belarus_mirovoy_opryt_vedeniya_lokomotivnogo_hozyaystva/) (Дата обращения: 23.12.2021).
14. Дубровская Т.А. Увеличение пропускной и провозной способности железнодорожного пути // Проблемы безопасности на транспорте : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. Гомель, 2020. Ч. 4. С. 24–25.
15. Об установлении скоростей движения поездов на Белорусской железной дороге (с изменениями и дополнениями) : приказ начальника дороги от 28 апр. 2021 № 231Н. Минск. 2021. 93 с.
16. Френкель С. Я. Техника тяговых расчетов. Гомель : БелГУТ, 2005. 80 с.
17. Сахаров П.А. Тяговые расчеты для участка железной дороги. Гомель : БелГУТ, 2016. 107 с.
18. Золотых Н.С. Усиление пропускной способности железнодорожных линий // Труды 80-й студенческой научно-практической конференции РГУПС. Воронеж, 2021. Ч. 2. С. 58–59 с.

### References

1. Al'-Aradzh Modar Obosnovaniye povysheniya moshchnosti zheleznykh dorog v ETS Siriyskoi Arabskoi Respubliki [Justification for increasing the capacity of railways in the UTS of the Syrian Arab Republic]. Candidate's thesis. Saint Petersburg, PSTU, 2000, 202 p.
2. Elektrovozy serii BKG Belorusskoi zheleznoi dorogi [Electric locomotives of the BKG series of the Belarusian Railway]. Available at: <https://railway-publish.com/articles-icut-magazine/articles-lokomotiv-inform/8319-elektrovozyi-serii-bkg-belorusskoy-zheleznoy-dorogi.html> (Accessed December 27, 2021).
3. Dovgelyuk N.V., Akhramenko G.V., Verbilo V.A. Rekonstruktsiya zheleznykh dorog [Reconstruction of railways]. Gomel: BelGUT Publ., 2017. 339 p.
4. Branishtov S.A., Shirvanyan A.M., Tumchenok D.A. Metody otsenki propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog [Methods of assessing the capacity of railways]. *Informatsionno – upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems]. 2014, no 5, pp. 51-57.

5. Krueger H. Parametric Modeling in Rail Capacity Planning // Proc. of 1999 Winter Simulation Conf., Piscataway, 1999. P. 1194 – 2000.
6. Kaas A. Methods to Calculate Capacity of Railways (Metoder Til Beregning af Jernbanekapacitet): Phd-thesis / Technical University of Denmark, 1998. 182 p.
7. Erofeev A.A., Kovtun P.V., Dubrovskaya T.A. Problemy povysheniya skorosti dvizheniya poezdov na sushchestvuyushchikh liniyakh [Problems of increasing the speed of trains on existing railway lines]. *Vestnik BelGUTA* [Bulletin of BelGUT]. 2018, no 2(37), pp. 57 – 59.
8. Uvelicheniye propusknoi sposobnosti [Increasing bandwidth]. Available at: <https://helpiks.org/8-86807.html>. (Accessed 19.12. 2021).
- 9 Mironov V.S., Dubrovskaya T.A. Sfera effektivnosti skorostnogo passazhirskogo transporta na zheleznykh dorogakh [The sphere of efficiency of high-speed passenger transport on railways]. *Materialy Devyatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura sibirskogo regiona»* [Proceedings of the Ninth International scientific-practical conference «Transport infrastructure of the Siberian region】. Irkutsk, 2018, vol. 1, pp. 534-538.
10. SNB 3.03.01-98. Zheleznyye dorogi kolei 1520mm [1520 mm gauge railways. National Standard 3.03.01-98]. Minsk: Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus', 1998. 26 p.
11. Galai E.I., Rudov P.K., Galai E.E. Issledovanie vzaimodeystviya tormoznykh sistem ehlektrovozov vl80, bkg1 i sostava vagonov pri vydole gruzovogo poezda s peregonu [Investigation of the interaction of the brake systems of electric locomotives vl80, bkg1 and the composition of cars during the withdrawal of a freight train from the haul]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye voprosy i perspektivy razvitiya transportnogo i stroitel'nogo kompleksa»* [Proceedings of IV International scientific and practical conference «Actual problems and perspectives of the development of transport and construction complexes】. Gomel', 2018, pp. 18–20.
12. Lokomotivy razvitiya [Locomotives of development]. Available at: <http://xpress.by/2018/11/21/lokomotivy-razvitiya/> (Accessed December 24, 2021).
13. Osobennosti lokomotivnogo hozyaistva v Respublike Belarus' i mirovoi opty vedeniya lokomotivnogo hozyaistva [Features of locomotive farming in the Republic of Belarus and the world experience of locomotive farming]. Available at: [https://studbooks.net/2169698/ekonomika/osobennosti\\_lokomotivnogo\\_hozyaystva\\_respublike\\_belarus\\_mirovoy\\_opty\\_vedeniya\\_lokomotivnogo\\_hozyaystva/](https://studbooks.net/2169698/ekonomika/osobennosti_lokomotivnogo_hozyaystva_respublike_belarus_mirovoy_opty_vedeniya_lokomotivnogo_hozyaystva/) (Accessed December 23, 2021).
14. Dubrovskaya, T.A. Uvelichenie propusknoi i provoznoi sposobnosti zheleznodorozhnnogo puti [Increasing the capacity and carrying capacity of the railway track]. *Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno – prakticheskoi konferentsii «Problemy bezopasnosti na transporte»* [Proceedings of the X International scientific and practical conference «Problems of safety in transport】. Gomel', 2020, part IV, pp. 24–25.
15. Prikaz nachal'nika dorogi ot 28 aprelya 2021 №231N «Ob ustanovlenii skorosti dvizheniya poyezdov na Belorusskoi zheleznoi doroge (s izmeneniyami i dopolneniyami)» [Order on the establishment of train speeds on the Belarusian Railway (with changes and additions)]. Minsk, 2021, 93 p.
16. Frenkel S. Ya. Tekhnika tyagovykh raschetov [Technique of traction calculations]. Gomel: BelSUT Publ., 2005. 80 p.
17. Sakharov P.A. Tyagovye raschety dlya uchastka zheleznoi dorogi [Traction calculations for the section of the railway]. Gomel: BelSUT Publ., 2016. 107 p.
18. Zolotykh N.S. Usilenie propusknoi sposobnosti zheleznodorozhnykh linii [Strengthening the capacity of railway lines]. *Trudy 80-y studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii RGUPS* [Proceedings of 80th student scientific and practical conference of RSTU]. Voronezh, 2021, part II, pp. 58–59.

### Информация об авторах

**Дубровская Татьяна Алексеевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, e-mail: rt-555@yandex.ru

**Тавтын Анастасия Валентиновна**, кафедра проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, e-mail: tavtyn98@mail.ru

### Information about the authors

**Tatyana A. Dubrovskaya**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Design, construction and operation of transport facilities», Belarusian State University of Transport, Gomel, e-mail: rt-555@yandex.ru

**Anastasiya V. Tavtyn**, Department «Design, construction and operation of transport facilities», Belarusian State University of Transport, Gomel, e-mail: tavtyn98@mail.ru

## Анализ показателей травматизма на федеральных автомобильных дорогах Иркутской области и их трендов

В. С. Асламова<sup>1</sup>, П. А. Кузнецова<sup>1</sup>, А. А. Асламов<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

✉ aaa\_mx@angtu.ru

### Резюме

В статье приводится сопоставление транспортного и социального рисков Иркутской области и России. Показано, что выдвинутая в Стратегии безопасности дорожного движения на 2018–2024 гг. цель снижения социального риска до уровня, не превышающего четырех погибших в дорожно-транспортных происшествиях, не может быть достигнута за указанный промежуток времени. Приведены характеристики трех федеральных автомобильных дорог, проходящих по Иркутской области. Выполнен системный анализ показателей дорожно-транспортных происшествий по статистике Госавтоинспекции за 2020 и 2021 г. Выявлено, что нет устойчивой тенденции снижения погибших на федеральных автодорогах Иркутской области. Отмечен сезонный характер динамики показателей происшествий. Максимальное абсолютное число происшествий реализуется на дороге Р-255, имеющей наибольшие протяженность и интенсивность автомобильного потока. Определены самые травмоопасные участки федеральных автодорог, на которых чаще всего возникают происшествия. Прослеживается четкая тенденция снижения числа раненых в происшествиях на федеральных автодорогах Иркутской области в 2021 г. С применением пакета Statgraphics Plus получены полиномиальные регрессионные модели численности накопленных за январь – октябрь 2020–2021 гг. показателей происшествий. Полученные модели описывают 99,4–99,7 % данных статистики. Выполнен прогноз показателей происшествий на ноябрь 2020 и 2021 г., показавший, что максимальная относительная ошибка прогноза не превышает 7,5 %. Контрольная проверка применения бюджетных ассигнований установила, что к 2020 г. в Иркутской области только 70,8 % федеральных автодорог соответствовали требованиям нормативов. Главные причины происшествий на автодорогах – неэффективность профилактической работы с несовершеннолетними, нехватка тематических телевизионных программ, редкость социальной рекламы, низкая результативность муниципальных программ, в которых не предусмотрены расходы на профилактику происшествий, нетрезвые водители за рулем.

### Ключевые слова

безопасность дорожного движения, социальный риск, транспортный риск, дорожно-транспортное происшествие, коэффициент детерминации, модель регрессии, тренд

### Для цитирования

Асламова В. С. Анализ показателей травматизма на федеральных автомобильных дорогах Иркутской области и их трендов / В. С. Асламова, П. А. Кузнецова, А. А. Асламов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 75–85. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).75-85

### Информация о статье

поступила в редакцию: 23.12.2021 г.; поступила после рецензирования: 23.01.2022 г.; принята к публикации: 27.01.2022 г.

## Analysis of federal vehicles injury rates on the roads of the Irkutsk region and their trends

V. S. Aslamova<sup>1</sup>, P. A. Kuznetsova<sup>1</sup>, A. A. Aslamov<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

✉ aaa\_mx@angtu.ru

### Abstract

The article compares the transport and social risks of the Irkutsk region and Russia. It is shown that the goal of reducing social risk to a level not exceeding 4 fatalities in road accidents put forward in the Road Safety Strategy for 2018–2024 is not achievable within the specified period of time. The characteristics of three federal highways passing through the Irkutsk region are given. A systematic analysis of indicators of road traffic accidents was carried out according to the statistics of the State Traffic Inspectorate for 2020 and 2021. It was revealed that there is no steady tendency for the number of deaths on federal highways of the Irkutsk region to reduce. The seasonal nature of the dynamics of accident indicators is noted. The maximum absolute number of accidents occurs on the R-255 road, which has the greatest length and traffic intensity. The most traumatic sections of federal highways have been determined with the highest occurrence of accidents. There is a clear downward trend in the number of people injured in accidents on the federal highways of the Irkutsk region in 2021. Using the Statgraphics Plus package, polynomial

regression models of the number of accumulated incident indicators for January-October 2020-2021 were obtained. The resulting models describe 99.4-99.7% of the statistical data. The forecast of accident indicators for November 2020 and 2021 was carried out, which showed that the maximum relative forecast error does not exceed 7.5%. A control audit of the application of budgetary appropriations found that by 2020 in the Irkutsk region, only 70.8% of federal highways met the requirements of the standards. The main causes of accidents therein are: ineffectiveness of preventive work with minors, lack of thematic television programs, rare social advertising, low efficiency of municipal programs, which do not include expenses for prevention of accidents, drunk drivers behind the wheel.

### Keywords

road safety, social risk, traffic risk, road traffic accident, coefficient of determination, regression model, trend

### For citation

Aslamova V. S., Kuznetsova P. A., Aslamov A. A. Analiz pokazatelei travmatizma na federal'nyh avtomobil'nyh dorogakh Irkutskoi oblasti i ikh trendov [Analysis of federal vehicles injury rates on the roads of the Irkutsk region and their trends]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 75–85. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).75-85

### Article Info

Received: 23.12.2021; revised: 23.01.2022; accepted: 27.01.2022.

### Введение

Анализ проблем в сфере обеспечения безопасности дорожного движения (ОБДД) и показателей травматизма на автодорогах имеет огромное социальное, экономическое и демографическое значение [1–5].

Уровень социального риска (СР) – число смертей в результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП), приходящийся на 100 тыс. населения – один из критериев, характеризующий безопасность движения на автодорогах. Отслеживанием его статистики в мире занимается Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ). Согласно данным этой статистики высокий СР характерен для бедных стран, что связывают с несовершенной инфраструктурой сети автодорог, некачественными дорогами, низкой степенью медицинского обслуживания пострадавших в ДТП [6]. На рис. 1 представлен уровень СР в некоторых странах по данным отчета ВОЗ [7].

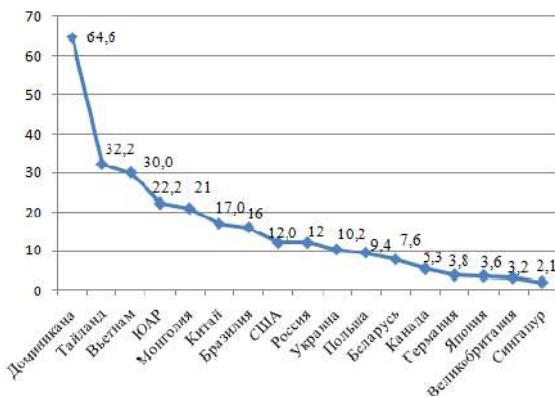


Рис. 1. Уровень социального риска  
Fig. 1. Social risk level

Из рис. 1 видно, что в 2019 г. уровень СР в России равен 12, а 2020 г., по данным Госавтоинспекции [8], фактическое значение СР по стране составляло 10,8, а в Иркутской области (ИО) – 12,8 (превышение российского показателя в 1,18 раз). СР в России равен 12. В 2019 г. согласно рейтингу [7] уровень СР не более 4 прослеживался в 13 странах: Нидерланды, Испания, Финляндия, Израиль, Германия, Дания, Япония, Великобритания, Ирландия, Швеция, Швейцария, Норвегия, Сингапур, Исландия, Кирибати, Мальдивы и Микронезия. В 2019 г. в мире погибло 17,2 чел. в среднем на 100 тыс. населения. В 1970-х годах в некоторых из перечисленных стран СР находился в пределах 13–19, и лишь спустя 30 лет достиг уровня не более 4 [6]. Поэтому выдвинутая в Стратегии безопасности дорожного движения (БДД) на 2018–2024 гг. [9] цель снижения СР до уровня не более 4 погибших в ДТП не достижима за такой короткий промежуток времени. Ведь чем ниже уровень СР, тем требуется больше времени для обеспечения дальнейшего его снижения, так как используемые ранее меры повышения БДД уже интенсивно при новых условиях не работают. Нужны новые инструменты и меры, которые предполагают более сложные градостроительные и инфраструктурные решения, кроме того требуется кардинально изменить поведение людей [6, 10, 11]. Проблему необходимо исследовать с позиции полного и качественного анализа причин, которые приводят к ДТП [12].

Другим инструментом для определения болевых точек является транспортный риск (ТР) – количество погибших в ДТП на 10 тыс.

сяч транспортных средств (ТС). Фактическое значение ТР для ИО составляет 3,71, что превышает российский показатель в 1,38 раз, хотя число ТС в ИО существенно меньше (в 71,54 раз) чем в РФ.

Об актуальности исследования свидетельствует и тот факт, что по итогам 2020 г. ИО заняла в двадцатке субъектов РФ с максимальным числом ДТП с потерпевшими 16-е место [13]. Кроме того, большая проблема для России и ИО – высокий уровень подросткового травматизма на автодорогах [14–16].

Целью исследования является поиск закономерностей динамики показателей ДТП на федеральных автодорогах (ФАД) ИО с применением регрессионного анализа данных статистики Госавтоинспекции [8] за 2020 и 2021 годы; выявление причин ДТП на ФАД ИО.

### Характеристики федеральных дорог Иркутской области

Характеристика трех ФАД, проходящих по ИО, приведена в табл. 1 [17].

**Таблица 1. Характеристика федеральных автомобильных дорог Иркутской области**  
**Table 1. Characteristics of the federal highways of the Irkutsk region**

Федераль- ная авто- мобильная дорога	$L$ участ- ка, км	Мак. ин- тенсив- ность, авт./сут.	Чис- ло мо- стов	Число ж/д пере- сеч.
P-255	745,0	28567	75	12
P-258	74,454	4992	8	3
A-331	749,27 2	13798	65	8

ИО в 2019 г. начала участвовать в национальном проекте «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (БКАД) для реализации следующих целей:

– повышение до 38,4 % доли региональных автодорог, соответствующих нормативным требованиям (НТ);

– понижение доли региональных и ФАД, работающих в режиме перегрузки, и сокращение на 10 % их протяженности;

– снижение в 2 раза количества мест концентраций ДТП;

– приведение до 85 % доли городских автодорог ИО в соответствие НТ [18].

Период реализации поставленных задач – 2019–2024 годы.

Проведенная контрольная проверка [19, 20] использования бюджетных ассигнований, направленных на содержание автодорог ИО, их соответствия НТ установила, что к 2020 году в ИО соответствуют НТ только 70,8% ФАД (табл. 2).

**Таблица 2. Протяженность автодорог ( $L$ ) федераль-  
ного и регионального значения и уровень их соот-  
ветствия нормативным требованиям ( $P$ )**

**Table 2. Length of highways ( $L$ ) of federal and regional  
significance and the level of their compliance regulatory  
requirements ( $P$ )**

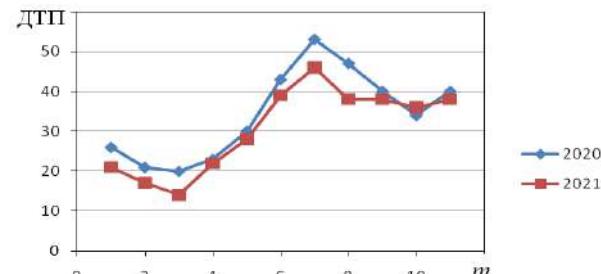
Дороги	2018		2019	
	$L$ , км	$P$ , %	$L$ , км	$P$ , %
Федеральные	1657,2	57,5	1628,5	70,8
Региональные	12011,8	28,3	12011,8	30,2

На содержание региональных автодорог в 2019 г. было направлено всего 29,6 % средств от нормативной потребности, что не позволяет поддерживать их подобающее техническое состояние.

### Динамика показателей дорожно- транспортных происшествий в 2020–2021 гг.

Сезонный характер динамики показателей ДТП отмечается в работе [21].

На рис. 2 представлена динамика численности ДТП (абсолютные значения) [8].



**Рис. 2. Динамика происшествий на федеральных автодорогах по месяцам  $m$**

**Fig. 2. Dynamics of accidents on federal highways by months  $m$**

Видно, что максимальное количество ДТП на ФАД реализуется в июле, что объясняется наибольшей интенсивностью транспортного потока, а минимальное число ДТП – в марте. Заметно также снижение числа ДТП в 2021 г.

На рис. 3 показана динамика погибших  $Sm$  в ДТП (абсолютные значения) [8]. Видно, что устойчивой тенденции снижения погибших в ДТП еще не сформировано.

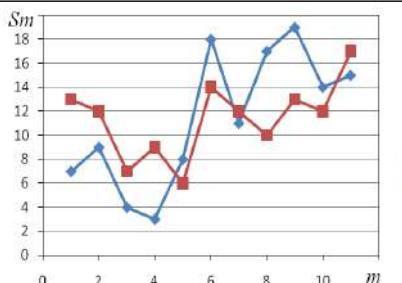


Рис. 3. Динамика погибших в происшествиях на федеральных автодорогах

Fig. 3. Dynamics of fatalities in accidents on federal highways

На рис. 4 представлена динамика раненых  $r$  в ДТП. Прослеживается четкая тенденция снижения числа раненых в ДТП в 2021 г.

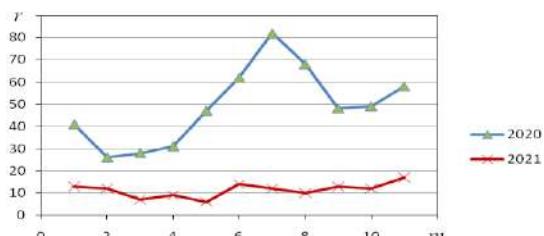


Рис. 4. Динамика раненых в происшествиях на федеральных автодорогах

Fig. 4. Dynamics of casualties in accidents on federal highways

На рис. 5 представлена сравнительная динамика ДТП для разных ФАД ИО за 2021 г. [8].

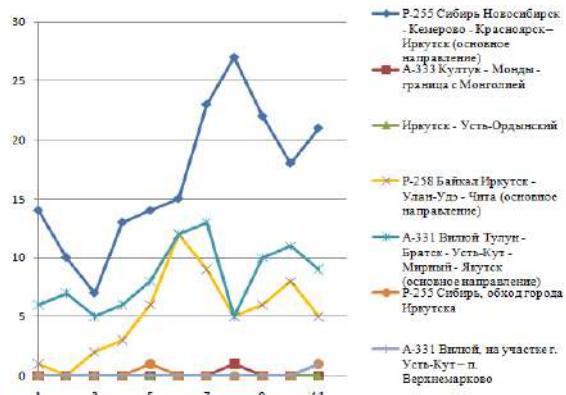


Рис. 5. Сравнительный анализ динамики дорожно-транспортных происшествий на разных федеральных дорогах Иркутской области в 2021 г.

Fig. 5. Comparative analysis of road accident dynamics on various federal roads of the Irkutsk region in 2021

Видно, что максимальное число ДТП отмечается на дороге Р-255, имеющей наибольшие протяженность и интенсивность автомо-

бильного потока.

Сравнение численности погибших в ДТП на разных ФАД ИО в 2021 г. приведено на рис. 6.

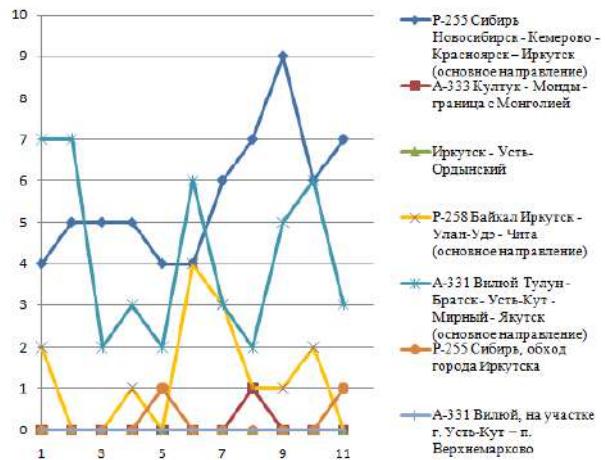


Рис. 6. Сравнение численности погибших на разных федеральных дорогах Иркутской области 2021 г.

Fig. 6. Comparison of the death toll on different federal roads of the Irkutsk region 2021

Из рис. 6 видно, что больше всего погибло (9 чел.) на дороге Р- 255 в августе 2021 г. На дороге А-331 наибольшее число погибших (7 чел.) в результате ДТП отмечается в январе, феврале и ноябре, что можно объяснить обледенением покрытия трассы и снижением видимости при снегопадах.

Сравнение численности раненых в ДТП на разных ФАД ИО в 2021 г. приведено на рис. 7.

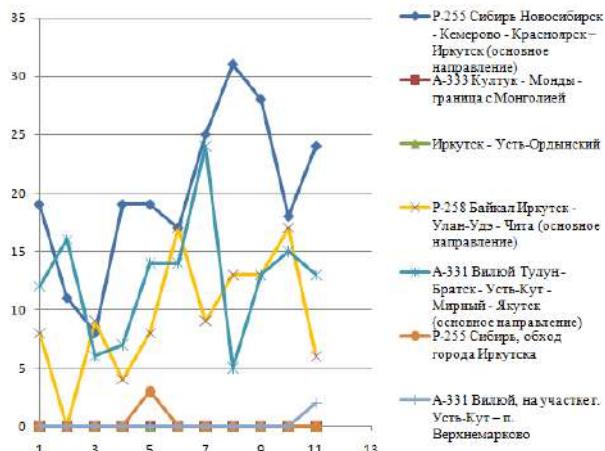


Рис. 7. Сравнение численности раненых на разных федеральных дорогах Иркутской области 2021 г.

Fig. 7. Comparison of the number of wounded on various federal roads of the Irkutsk region 2021

Из рис. 7 видно, что максимальное число

раненых наблюдается на ФАД Р-255 в августе, на Р-258 – в июне и октябре, на А-331 – в июле.

Сравнение тяжести последствий (ТП), равной проценту отношения числа погибших в ДТП к 100 раненым, на различных ФАД ИО в 2021 г. представлено на рис. 8.

Причина высокого значения ТП на А-331 – одно смертельное ДТП за 11 мес. 2021 г.

В табл. 2 указаны накопленные за 11 мес. 2021 г. показатели ДТП для разных ФАД ИО.

Наиболее травмоопасные участки ФАД ИО, на которых чаще всего происходят ДТП:

– 1 370 км (7 раненых) и 1 711 км (8 раненых) Р-255 (основное направление);

– 82 км (8 раненых) и 93 км (12 раненых) Р-258 (основное направление);

– 196 км (12 раненых), 224 км (7 раненых) и 221 км (7 раненых) А-331 (основное направление).

Причинами отсутствия устойчивой динамики снижения показателей ДТП, по словам Министерства внутренних дел, служат: несостоительность массированной профилактической пропаганды по транспортному травматизму несовершеннолетних, нехватка тематических телевизионных программ, редкость социальной рекламы, низкая эффективность муниципальных программ, в которых не предусмотрены расходы на профилактику ДТП [22], не-

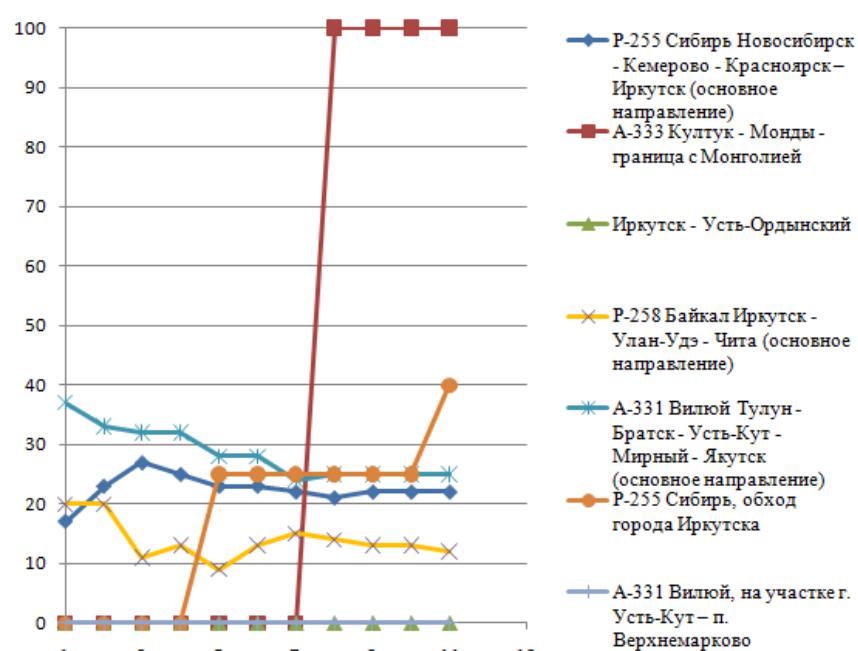


Рис. 8. Сравнение тяжести последствий происшествий на федеральных дорогах Иркутской области в 2021 г.

Fig. 8. Comparison of the consequence severity for accidents on federal roads of the Irkutsk region in 2021

Таблица 2. Суммарные показатели дорожно-транспортных происшествий на федеральных автомобильных дорогах Иркутской области

Table 2. Total indicators of road accidents on federal highways of Irkutsk region

Наименование федеральной автомобильной дороги	Количество			
	Дорожно-транспортных происшествий	Погибших	Раненых	Тяжелых последствий
Р-255 (основное направление)	184	62	219	247
А-333 (граница с Монголией)	1	1	0	400
Иркутск – Усть-Ордынский	0	0	0	0
Р-258 (основное направление)	57	14	104	153
А-331 (основное направление)	92	46	139	314
Р-255 Сибирь, обход г. Иркутска	2	2	3	190
А-331, на участке г. Усть-Кут – п. Верхнемарково	1	0	2	0

трезвые водители [22, 23].

### Регрессионные модели показателей дорожно-транспортных происшествий на федеральных автомобильных дорогах в Иркутской области за 10 месяцев 2020 и 2021 гг.

Данные статистики [7] ДТП на ФАД ИО за  $m = 1\text{--}10$  месяцев обрабатывались в пакете Statgraphics Plus. Вид регрессионной модели устанавливался по наибольшему значению коэффициента детерминации  $R^2$ , %, указывающему процент наблюдаемых данных, которые аппроксимируются полученной моделью. Для оценки тесноты связи между зависимой и независимой переменными применялся скорректированный коэффициент детерминации  $R^2_c$ , %. Точность модели оценивалась по среднеквадратической  $\sigma$  и абсолютной  $\Delta$  ошибкам. Отсутствие автокорреляции в статистических данных устанавливали по критерию Дарбина-Уотсона (DW). Критерии адекватности всех полученных моделей регрессии указаны в табл. 3.

На рис. 9 представлена динамика накопленной (с января по октябрь 2020 г) численности ДТП  $d_{20}$  на ФАД ИО, аппроксимируемая параболической моделью (1):

$$d_{20} = 4,967 + 15,565m + 1,886m^2 \quad (1)$$

Точками на рис. 9 обозначены наблюдаемые данные, а уравнение регрессии – линией.

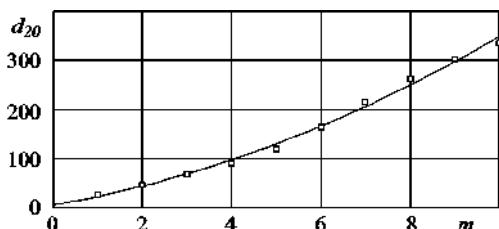


Рис. 9. Динамика численности происшествий на федеральных автодорогах Иркутской области в 2020 г.

Fig. 9. Dynamics of the number of accidents on federal highways of the Irkutsk region in 2020

На рис. 10 дано сопоставление наблюдаемых  $d_{20n}$  и рассчитанных  $d_{20p}$  по формуле (1) значений, которые позволяют судить о точности найденной модели.

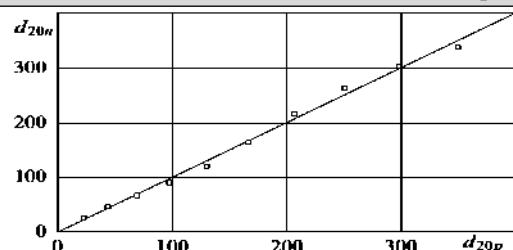


Рис. 10. Сопоставление наблюдаемых  $d_{20n}$  и рассчитанных  $d_{20p}$  по формуле (1) значений  
Fig. 10. Comparison of the observed  $d_{20n}$  and calculated  $d_{20p}$  values according to formula (1)

Динамика интегральной смертности при ДТП описывается параболой (2):

$$Sm_{20} = 7,20 + 0,68m + 0,985m^2, \quad (2)$$

представленной на рис. 11

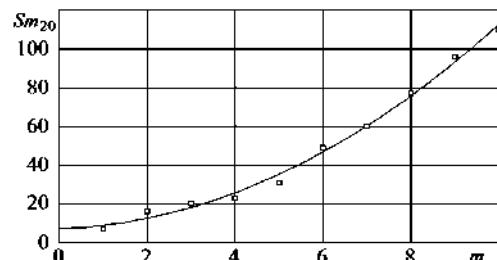


Рис. 11. Динамика интегральной смертности в происшествиях на автодорогах Иркутской области в 2020 г.

Fig. 11. Dynamics of integral mortality in road accidents on highways of the Irkutsk region in 2020

На рис. 12 дано сопоставление наблюдаемых  $Sm_{20n}$  и рассчитанных  $Sm_{20p}$  по формуле (2) значений.

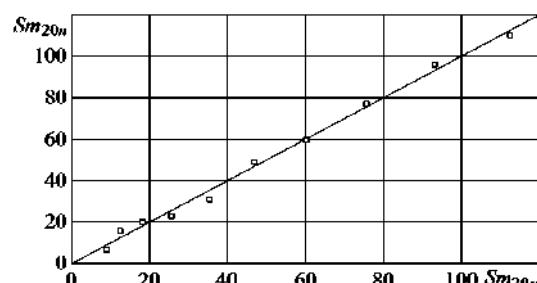


Рис. 12. Сопоставление наблюдаемых  $Sm_{20n}$  и рассчитанных  $Sm_{20p}$  по формуле (2) значений  
Fig. 12. Comparison of the observed  $Sm_{20n}$  and calculated  $Sm_{20p}$  values according to formula (2)

Динамика интегральной численности раненых описывается параболой (3):

$$r_{20} = 6,283 + 23,176m + 2,640m^2, \quad (3)$$

которая приведена на рис. 13.

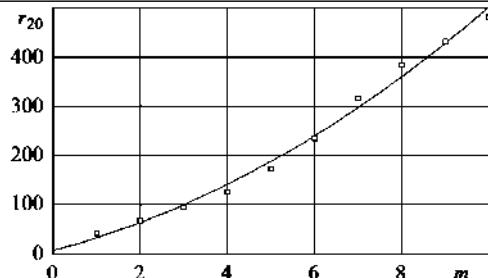


Рис. 13. Динамика интегральной численности раненых в происшествиях на автодорогах Иркутской области в 2020 г.

Fig. 13. Dynamics of the integral number injured in road accidents on highways of the Irkutsk region in 2020

На рис. 14 сопоставляются наблюдаемые  $r_{20n}$  и рассчитанные  $r_{20p}$  по формуле (3) значения.

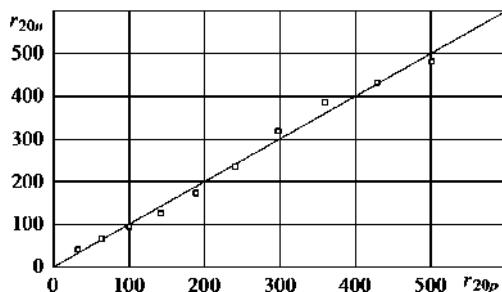


Рис. 14. Сопоставление наблюдаемых  $r_{20n}$  и рассчитанных  $r_{20p}$  по формуле (3) значений

Fig. 14. Comparison of the observed  $r_{20n}$  and calculated  $r_{20p}$  values according to formula (3)

На рис. 15 представлена динамика накопленной за 2021 г. численности ДТП  $d_{21}$  на ФАД ИО, аппроксимируемая параболической моделью (4):

$$d_{21} = 3,70 + 11,826m + 1,856m^2 \quad (4)$$

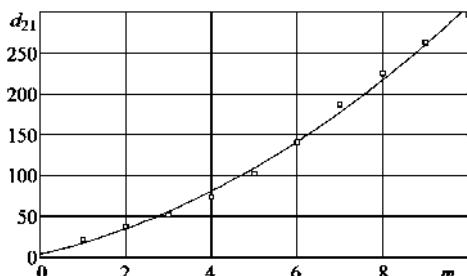


Рис. 15. Динамика численности происшествий на федеральных автодорогах Иркутской области в 2021 г.

Fig. 15. Dynamics of the number of accidents on federal highways of the Irkutsk region in 2021

На рис. 16 приводится сопоставление наблюдаемых  $d_{21n}$  и рассчитанных  $d_{21p}$  по фор-

муле (4) значений, позволяющее судить о точности найденной модели.

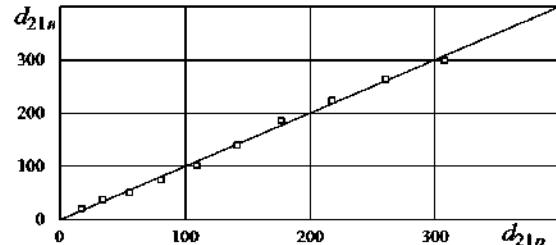


Рис. 16. Сопоставление наблюдаемых значений  $d_{21n}$  и рассчитанных  $d_{21p}$  по формуле (4)

Fig. 16. Comparison of the observed values of  $d_{21n}$  and calculated  $d_{21p}$  according to the formula (4)

Динамика интегральной смертности при ДТП описывается параболой (5):

$$Sm_{20} = 7,250 + 7,112m + 0,299m^2, \quad (5)$$

которая приведена на рис. 17.

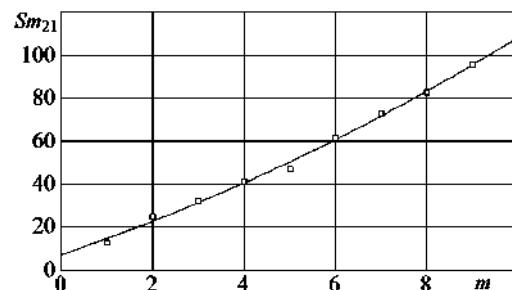


Рис. 17. Динамика интегральной смертности в происшествиях на автодорогах Иркутской области в 2021 г.

Fig. 17. Dynamics of integral mortality in road accidents on highways of the Irkutsk region in 2021

На рис. 18 дается сопоставление наблюдаемых  $Sm_{20n}$  и рассчитанных  $Sm_{20p}$  по формуле (5) значений.

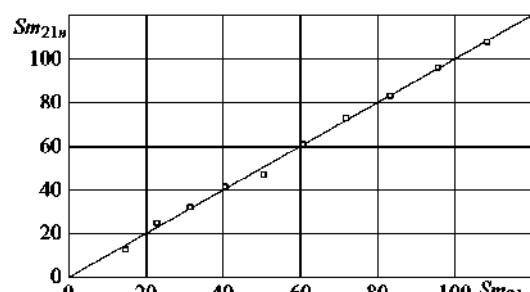


Рис. 18. Сопоставление наблюдаемых  $Sm_{20n}$  и рассчитанных  $Sm_{20p}$  по формуле (5) значений

Fig. 18. Comparison of the observed  $Sm_{20n}$  and calculated values  $Sm_{20p}$  according to the formula (5) the value

Динамика интегральной численности раненых, описывается формулой (6):

$$r_{21} = 6,283 + 23,176m + 2,640m^2 \quad (6)$$

и приведена на рис. 19.

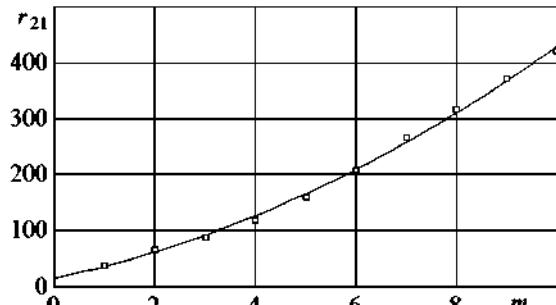


Рис. 19. Динамика интегральной численности раненых в происшествиях на автодорогах Иркутской области в 2021 г.

Fig. 19. Dynamics of the integral number of injured in road accidents on highways of the Irkutsk region in 2021

На рис. 20 дается сопоставление наблюдаемых  $r_{21n}$  и рассчитанных  $r_{21p}$  по формуле (6) значений.

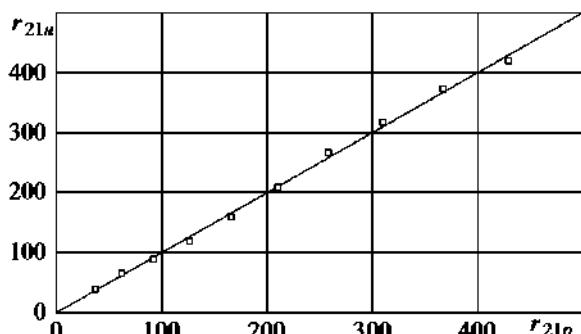


Рис. 20. Сопоставление наблюдаемых  $r_{21n}$  и рассчитанных  $r_{21p}$  по формуле (6) значений

Fig. 20. Comparison of the observed  $r_{21n}$  and calculated  $r_{21p}$  values according to the formula (6)

Таблица 3. Критерии адекватности моделей

Table 3. Criteria for the adequacy of the models

Номер модели	$R^2, \%$	$R^2_c, \%$	DW	$\sigma$	$\Delta$
(1)	99,43	99,26	2,08	3,07	2,34
(2)	99,43	99,26	2,08	3,07	2,34
(3)	99,14	98,89	0,97	16,84	12,08
(4)	99,58	99,46	0,97	7,27	5,37
(5)	99,76	99,68	2,31	1,77	1,12
(6)	99,77	99,70	1,17	7,32	5,55

По моделям (1) – (6) выполнен прогноз показателей травматизма для ноября (табл. 4). Относительная ошибка  $\lambda, \%$  вычислялась по

формуле:

$$\lambda = 100 \frac{(\text{расчет.зн. показателя} - \text{факт. зн. показателя})}{\text{факт. зн. показателя}}$$

Таблица 4. Прогноз показателей дорожно-транспортных происшествий на ноябрь 2020 и 2021 г.

Table 4. Accident rates forecast for November 2020 and 2021

Год	ДТП	$\lambda, \%$	погибло	$\lambda, \%$	ранено	$\lambda, \%$
2020	404,4	7,3	134,0	7,2	580,7	7,5
2021	358,4	6,3	121,7	-2,6	495,8	6,2

### Заключение

Интегральные показатели ДТП за рассматриваемый период времени имеют параболический тренд. Полученные уравнения регрессии обладают высокими показателями достоверности и могут быть использованы для прогноза показателей ДТП. Выполненный прогноз показателей на ноябрь 2020 и 2021 г. показал, что относительная ошибка прогноза не превышает 7,5 %. Учет динамики показателей ДТП на ФАД позволит увеличить эффективность мероприятий по ОБДД [1].

Следует отметить, что ИО занимает первое место в России по обнаружению водителей, повторно садящихся за руль в алкогольном опьянении [23], что делает задачу по профилактической работе с водителями личного и общественного автотранспорта первостепенной и требует ужесточения административных мер к нарушителям.

Для снижения травмоопасности ФАД ИО планомерно осуществляется вывод транзитных автотранспортных потоков за пределы населенных пунктов (перетрасировка в объезд Ангарска, Иркутска, в настоящее время вокруг Усолье-Сибирского). Кардинально меняется технология дорожного строительства в сторону повышения категорийности дорог, увеличения грузоподъемности и скоростного режима. Также выделяются средства на ликвидацию травмоопасных участков: разделение, спрямление и расширение проезжих полос, освещение опасных участков, установка ограждений, строительство транспортных развязок, оборудование стоянок, автоматизированная видеорегистрация правонарушений, разработка мобильных навигационных систем с GPS/GЛОНАСС позиционированием и т. д.

**Список литературы**

1. Аземша С.А., Караваевич С. Н. Учет динамики аварийности при разработке мероприятий по повышению безопасности дорожного движения // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XII Националь. науч.-практ. конф. с международ. участием. Тюмень : Изд-во ТИУ, 2019. Т. 2. С. 8–14.
2. Гусельников Ю.А. Проблемы контроля обеспечения безопасности дорожного движения в субъектах транспортной деятельности // Вестн. Курган. гос. ун-та. 2015. № 3. С. 70–82.
3. Хабибуллин Д.Р., Ильдарханов Р.Ф. Современные проблемы безопасности дорожного движения // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XII Националь. науч.-практ. конф. с международ. участием. Тюмень : Изд-во ТИУ, 2019. Т. 2. С. 101–108.
4. Гусельников Ю.А., Борщенко Я.А. Решение проблем организационно-нормативного обеспечения безопасности дорожного движения // Изв. Тульск. гос. ун-та. 2015. Вып. 6. Ч. 1. С. 3–11.
5. Lebedeva O., Kripak M. Modeling of public transport waiting time indicator for the transport network of a large city // MATEC Web of Conferences ICMTMTE. 2018. DOI:10.1051/matecconf/201822404018.
6. Пьянкова А.И., Фаттахов Т.А. Смертность от дорожно-транспортных происшествий в России: подходы к оценке, тенденции и перспективы // Демографическое обозрение. 2019. № 6 (3). С. 58–84.
7. Рейтинг стран по уровню смертности в ДТП // NoNews : сайт. URL: <https://nonews.co/countries/mortality-road-traffic> (дата обращения 10.11.2021).
8. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения // Госавтоинспекция : офиц. сайт Министерства внутренних дел Рос. Федерации. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 02.11.2021).
9. Стратегия безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018–2024 годы : распоряжение Правительства РФ от 8 янв. 2018 г. № 1-р.
10. Крипак М.Н., Колесник А.И. Проблемы и перспективы развития транспортной инфраструктуры в современных городах // Сб. науч. тр. Ангар. гос. техн. ун-та. 2014. Т. 1. № 1. С. 194–198.
11. Ефремовская К.Н., Крипак М.Н. Возможность применения мирового опыта развития системы общественного транспорта в городе Севастополе // Современные технологии: проблемы и перспективы : сб. ст. всерос. науч.-практ. конф. для аспирантов, студентов и молодых учёных. Севастополь, 2019. С. 133–136.
12. Крамаренко Б.А. Транспортные и социальные риски в определении объективной картины в сфере ОБД // Грузовик. 2020. № 6. С. 47–48.
13. Иркутская область вошла в ТОП-20 регионов по числу ДТП с пострадавшими в 2020 году // Ирк.ру : информац. сайт Иркут. обл. URL: <https://www.irk.ru/news/20201109/crash/> (дата обращения 09.12.2021).
14. Асламова В.С., Минко А.А., Асламов А.А. Прогнозные модели травматизма с участием подростков на автомобильных дорогах общего пользования // Математические методы в технике и технологиях. 2021. № 1. С. 174–177.
15. Минко А.А., Асламова В.С. Сравнительный анализ травматизма с участием детей на автомобильных дорогах России // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 417–421.
16. Асламова В.С., Минко А.А., Асламов А.А. Регрессионные модели травматизма на автомобильных дорогах России // Образование – Наука – Производство : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2020. Т. 2. С. 109–113.
17. Прибайкалье : сайт ФКУ Упрдор. URL: <https://irkroad.ru> (дата обращения 11.10.2021).
18. Национальный проект «Безопасные и качественные дороги» 2019–2024 : опыт реализации приоритетного проекта «Безопасные и качественные дороги» на региональных и муниципальных автомобильных дорогах Иркутской области 2020 // ОГКУ «Дирекция автодорог» : сайт. URL: <http://dor38.ru/bkad-2-0/> (дата обращения 09.10.2021).
19. Богомолов В.Н. Отчет о результатах контрольного мероприятия «Проверка использования бюджетных ассигнований, направленных на содержание автомобильных дорог общего пользования федерального, регионального и муниципального значения в 2018 году и истекшем периоде 2019 года» // Счетная палата Российской Федерации : сайт. М., 2020. URL: <c8e8afe3c8e348dc67f36bd6e24bf5c8.pdf> (дата обращения 18.10.2021).
20. Асламова В.С., Кузнецова П.А., Асламов А.А. Сравнительный анализ дорожно-транспортных происшествий в Иркутской области и России // Вестн. Ангар. гос. техн. ун-та. 2021. № 15. С. 127–130.
21. Паршина К.С., Печатнова Е.В. Снижение риска ДТП на основе анализа аварийности по месяцам года // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Томск : Изд-во ТПУ, 2017. С. 623–625.
22. Число ДТП снизилось в 2020 году на 16% в Иркутской области // ИрСити : сайт. URL: <https://ircity.ru/news/54363/> (дата обращения 10.10.2021).
23. В Иркутской области в 2020 году 78 человек погибло по вине пьяных водителей // Ирк.ру : информац. сайт Иркут. обл. URL: <https://www.irk.ru/news/20201030/crash/> (дата обращения 10.10.2021).

**References**

- 1 Azemsha S. A., Karasevich S. N. Uchet dinamiki avariinosti pri razrabotke meropriyatiy po povysheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Taking into account the dynamics of accidents when developing measures to improve road safety]. *Materialy XII Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya»*. (V 2-kh tomakh) [Proceedings of the XII National scientific and practical conference with international participation «Organization and road safety» (In 2 volumes)]. Tyumen': TIU Publ., 2019, vol.2, pp. 8-14.
2. Gusel'nikov Yu.A. Problemy kontrolya obespecheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v sub"ektah transportnoi deyatel'nosti [Solving the problems of organizational and regulatory road safety]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Kurgan State University]. 2015, no 3, pp. 70-82.

3. Khabibullin D.R., Ildarkhanov R.F. Sovremennye problemy bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Modern problems of road safety]. *Materialy XII Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferencii s mezdunarodnym uchastiem «Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya».* (V 2-kh tomakh) [Proceedings of the XII National scientific and practical conference with international participation «Organization and road safety» (In 2 volumes)]. Tyumen': TIU Publ., 2019, vol.2, pp. 101-108.
4. Gusel'nikov Yu.A., Borshchenko Ya.A. Reshenie problem organizatsionno-normativnogo obespecheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Solving the problems of organizational and regulatory road safety]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Tula State University]. 2015, vol. 6, part 1, pp. 3-11.
5. Lebedeva O., Kripak M. Modeling of public transport waiting time indicator for the transport network of a large city. MATEC Web of Conferences 224, 04018 (2018) ICMTMTE 2018. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822404018>.
6. P'yankova A.I., Fattahov T.A. Smertnost' ot dorozhno-transportnykh proisshestvii v Rossii: podkhody k otsenke, tendentsii i perspektivy [Mortality from road traffic accidents in Russia: approaches to assessment, trends and prospects]. *Demograficheskoe obozrenie* [Demographic Review]. 2019, no 6 (3), pp. 58-84.
7. Reiting stran po urovnyu smertnosti v DTP - NoNews.co (Elektronnyi resurs) [Ranking of countries by the death rate in road accidents - NoNews.co (Electronic Recourse)]. Available at: <https://nonews.co/countries/mortality-road-traffic> (date access November 10, 2021).
8. Svedeniya o pokazatelyah sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya: sait Gosavtoinspeksii (Elektronnyi resurs) [Information about road safety indicators: website of the State Traffic Inspectorate (Electronic Recourse)]. Available at: <http://stat.gibdd.ru/> (date access November 2, 2021).
9. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 8 yanvarya 2018 g. N 1-r «Strategiya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v Rossiiskoi Federatsii na 2018 - 2024 gody» [Road Safety Strategy in the Russian Federation for 2018 – 2024, Order of the Government of the Russian Federation of January 8, 2018 N 1-r].
10. Kripak M.N., Kolesnik A.I. Problemy i perspektivy razvitiya transportnoi infrastruktury v sovremennykh gorodakh [Problems and prospects for the development of transport infrastructure in modern cities]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of scientific papers of the Angarsk State Technical University]. 2014, vol. 1, no 1, pp. 194-198.
11. Efremovskaya K.N., Kripak M.N. Vozmozhnost' primeneniya mirovogo optya razvitiya sistemy obshchestvennogo transporta v gorode Sevastopole [The possibility of applying the world experience in the development of the public transport system in the city of Sevastopol]. *Sbornik statei vserossiyskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii dlya aspirantov, studentov i molodykh uchenykh «Sovremennye tekhnologii: problemy i perspektivy»* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference for graduate students, students and young scientists «Modern technologies: problems and prospects»]. Sevastopol', 2019, pp. 133-136.
12. Kramarenko B.A. Transportnye i sotsial'nye riski v opredelenii ob"ektivnoi kartiny v sfere OBD [Transport and social risks in determining the objective picture in the field of HBS]. *Gruzovik* [Truck]. 2020, no 6, pp. 47-48.
13. Irkutskaya oblast' voshla v TOP-20 regionov po chislu DTP s postradavshimi v 2020 godu (Elektronnyi resurs) [The Irkutsk Region entered the TOP-20 regions in terms of the number of road accidents with victims in 2020 (Electronic Recourse)]. Available at: <https://www.irk.ru/news/20201109/crash/> (access December 9, 2021).
14. Aslamova V.S., Minko A.A., Aslamov A.A. Prognoznye modeli travmatizma s uchastiem podrostkov na avtomobil'nykh dorogakh obshhego pol'zovaniya [Predictive models of injuries involving adolescents on public roads]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh* [Mathematical methods in engineering and technology]. 2021, no 1, pp. 174-177.
15. Minko A.A., Aslamova V.S. Sravnitel'nyy analiz travmatizma s uchastiem detei na avtomobil'nykh dorogakh Rossii [Comparative analysis of injuries involving children on the roads of Russia]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia]. 2021, no 2 (12), pp. 417-421.
16. Aslamova V.S., Minko A.A., Aslamov A.A. Regressionnye modeli travmatizma na avtomobil'nykh dorogakh Rossii [Regression Models of Injury on Highways in Russia]. *Materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «OBRAZOVANIE – NAUKA – PROIZVODSTVO»* [Proceedings of the IV All-Russian scientific-practical conference «EDUCATION – SCIENCE – PRODUCTION»]. Chita, 2020, vol. 2, pp. 109-113.
17. Sait FKU Updror «Pribaykal'e» (Elektronnyi resurs) [The website of the FKU Updror «Baikal region» (Electronic resource)]. Available at: <https://irkroad.ru> (date access October 11, 2021).
18. Natsional'nyi proekt «Bezopasnye i kachestvennye dorogi» 2019-2024. Opty realizatsii prioritetnogo proekta «Bezopasnye i kachestvennye dorogi» na regional'nyh i mezhmunitsipal'nyh avtomobil'nyh dorog Irkutskoi oblasti (Elektronnyi resurs) [National project «Safe and high-quality roads» 2019-2024. Experience in implementing the priority project «Safe and high-quality roads» on regional and inter-municipal highways of the Irkutsk region (Electronic resource)]. Available at: <http://dor38.ru/bkad-2-0/> (date access October 9, 2021).
19. Bogomolov V.N. Otchet o rezul'tatakh kontrol'nogo meropriyatiya «Proverka ispol'zovaniya byudzhetnyh assignovanii, napravlennyh na soderzhanie avtomobil'nyh dorog obshchego pol'zovaniya federal'nogo, regional'nogo i mezhmunitsipal'nogo znacheniya v 2018 godu i istekshem perioede 2019 goda» (Elektronnyi resurs) [Report on the results of the control event «Verification of the use of budget allocations aimed at the maintenance of public roads of federal, regional and inter-municipal significance in 2018 and the expired period of 2019» (Electronic resource)]. Available at: [c8e8afe3c8e348dc67f36bd6e24bf5c8.pdf/](c8e8afe3c8e348dc67f36bd6e24bf5c8.pdf) (date access October 18, 2021).
20. Aslamova V.S., Kuznetsova P.A., Aslamov A.A. Sravnitel'nyy analiz dorozhno-transportnykh proisshestvii v Irkutskoi oblasti i Rossii [Comparative analysis of road accidents in the Irkutsk region and Russia]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Angarsk State Technical University]. 2021, no 15, pp. 127-130.
21. Parshina K.S., Pechatnova E.V. Snizhenie riska DTP na osnove analiza avariinosti po mesyatsam goda [Reducing the risk of road accidents based on the analysis of accidents by months of the year]. *Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi*

*konferentsii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov «Ekologiya i bezopasnost' v tekhnosfere: sovremennoye problemy i puti resheniya»* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students «Ecology and safety in the technosphere: modern problems and solutions»]. Tomsk, 2017, pp. 623- 625.

22. Chislo DTP snizilos' v 2020 godu na 16 % v Irkutskoy oblasti (Elektronnyi resurs) [The number of road accidents decreased in 2020 by 16% in the Irkutsk region (Electronic Recourse)]. Available at: <https://ircity.ru/news/54363/> (access October 10, 2021).

23. V Irkutskoi oblasti v 2020 godu 78 chelovek pogiblo po vине p'yanykh voditelei (Elektronnyy resurs) [In the Irkutsk region in 2020, 78 people died due to the fault of drunk drivers (Electronic Recourse)]. Available at: <https://www.irk.ru/news/20201030/crash/> (access October 10, 2021).

### Информация об авторах

**Асламова Вера Сергеевна**, д-р техн. наук, профессор профессор кафедры техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: aslamovav@yandex.ru

**Кузнецова Полина Андреевна**, магистрант кафедры техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: polina-kuznetsova-98@bk.ru

**Асламов Александр Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических производств, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: aaa\_mx@angtu.ru

### Information about the authors

**Vera S. Aslamova**, Doctor of Engineering Science, Professor, the Full Professor of the Department «Technosphere Safety», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: aslamovav@yandex.ru

**Polina A. Kuznetsova**, master's student of Department «Technosphere safety», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: polina-kuznetsova-98@bk.ru

**Alexander A. Aslamov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Department «Machines and Devices of Chemical Production», Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: aaa\_mx@angtu.ru

## Оценка грузового спроса посредством восстановления матриц корреспонденций с использованием различных данных

О. А. Лебедева<sup>1</sup>, В. Е. Гозбенко<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup>Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ vgozbenko@yandex.ru

### Резюме

Важным научным направлением развития организации грузового перевозочного процесса является изучение методик оценки матриц корреспонденций с использованием различных данных, что соответствует стратегии социально-экономического развития Иркутской области на период до 2036 года. Автомобильный городской грузовой транспорт является важной частью транспортной системы Российской Федерации, эффективное функционирование которой создает условия для развития экономики, обеспечения удовлетворения транспортных потребностей. В этих условиях повышение требований к качеству транспортных услуг и обеспечению безопасности и устойчивости функционирования транспортной системы является современным вызовом, стоящим перед автомобильным транспортом и требующим четкого определения приоритетов, целей и задач развития автомобильного транспорта, как подотрасли транспортного комплекса страны. Актуальность научной статьи заключается в том, что проблема оценки грузового спроса посредством оценки матриц корреспонденций носит комплексный характер. С 1970-х гг. разработано несколько методов для оценки матриц корреспонденций с использованием всех видов данных. Показано, что некоторые методики могут применяться только в определенных ограниченных условиях и иногда приводят к потере информации. Для того чтобы решить эту задачу предлагается использовать эластичные, а не фиксированные ограничения. Альтернативным вариантом является применение метода стохастической оценки (бинарной калибровки) из-за отсутствия коэффициентов, зависящих от времени и пространства. Этот метод может использоваться при прогнозировании деятельности грузового транспорта в городских агломерациях в виде единой системы, гарантирующей соблюдение нормативов качества его обслуживания при высокой эффективности работы транспортной системы. Сравнительный анализ различных методов оценки матрицы является целью данной статьи.

### Ключевые слова

матрица корреспонденций, транспортный поток, моделирование, грузовой спрос

### Для цитирования

Лебедева О. А. Оценка грузового спроса посредством применения матриц корреспонденций с использованием различных данных/ О. А. Лебедева, В. Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 86–94. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).86-94

### Информация о статье

поступила в редакцию: 11.01.2021 г.; поступила после рецензирования: 18.03.2022 г.; принята к публикации: 21.03.2022 г.

## Assessing cargo demand through matrix recovery correspondence using different data

О. А. Lebedeva<sup>1</sup>, V. E. Gozbenko<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup>Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ vgozbenko@yandex.ru

### Abstract

An important scientific direction in the development of the organization of the freight transportation process is the study of methods for evaluating correspondence matrices using various data, which corresponds to the strategy of socio-economic development of the Irkutsk region for the period up to 2036. Automobile urban freight transport is an important part of the transport system of the Russian Federation, whose effective functioning creates conditions for the development of the economy, ensuring the satisfaction of transport needs. Under these conditions, increasing the requirements for the quality of transport services and ensuring the safety and sustainability of the transportation system functioning are a present day challenge facing road transport and requiring a clear definition of priorities, goals and objectives for the development of road transport, as a sub-brunch of the country's transport complex. The relevance of the scientific article lies in the fact that the problem of assessing freight demand by evaluating correspondence matrices is complex. Since the 1970s, several methods have been developed to evaluate correspondence matrices using all kinds of data. It has been shown that some techniques can be applied only under certain limited conditions and

may result in information losses. To solve this problem, it is proposed to use elastic rather than fixed links. Another option is to use the stochastic estimation method (binary calibration) due to the lack of coefficients depending on time and space, this method can be used to predict the activity of freight transport in urban agglomerations in the form of a single system to guarantee the compliance with the quality standards of its service under high operational efficiency transport system. Comparative analysis of various matrix estimation methods is the purpose of this article.

### Keywords

correspondence matrix, traffic flow, modeling, freight demand

### For citation

Lebedeva O. A., Gozbenko V. E. Otsenka gruzovogo sprosa posredstvom primeneniya matrits korrespondentsii s ispol'zovaniem razlichnykh dannykh [Assessing cargo demand through matrix recovery correspondence using different data]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 86–94. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).86-94

### Article Info

Received: 11.01.2021; revised: 18.03.2022; accepted: 21.03.2022.

### Введение

Матрица корреспонденций (OD) содержит данные о поездках между несколькими пунктами за определенный период времени. Основная часть базовой информации о транспортном спросе используется для следующих целей:

- транспортное планирование и проектирование: расчета транспортных потоков и прогнозирование эффективного функционирования улично-дорожной сети;
- оценка альтернативных вариантов и анализа чувствительности;
- моделирование транспортных потоков сети, проектирование устройств управления дорожным движением и задания параметров сигналов для регулируемых перекрестков.

В зависимости от цели исследования информация, хранящаяся в матрице корреспонденций, может быть конкретизирована в отношении:

- размера области исследования (перекресток, район, город, регион, страна);
- видов транспортных средств;
- периодов времени (времени суток): 24 часа, час пик, 15-минутные интервалы;
- даты;
- цели: мест приложения труда и отдыха.

Если матрица корреспонденций содержит информацию на текущую дату, она называется «матрицей базового года». Такая матрица позволяет производить оценку, используя все доступные виды транспортных данных:

- полные данные (из-за организационных и финансовых ограничений не применяются);
- неполные, прямые и косвенные данные.

Неполные данные получаются при проведении выборочного обследования; прямые данные – в результате наблюдений; косвенные

данные – результат расчета поездок с использованием других источников информации (подсчет транспортных потоков и маршрутные перевозки). Примерами таких данных являются:

- опросы: отслеживаются поездки людей, проживающих в районе обследования;
- дорожные анкеты (отслеживаются поездки только проезжающих людей), недостатками являются двойной учет, а также искажение оценок на дальние расстояния;
- данные из транспортных билетов (может отсутствовать OD информация);
- подсчет транспортных потоков (учитываются только объемы на участке улично-дорожной сети);
- информация о выборе маршрута;
- «старые» матрицы корреспонденций.

При дополнении данных возникают сложности, так как все их источники являются неполными, большее количество поездок (пар OD) не учитывается. Источники сведений показывают, что стохастические свойства данных могут привести к противоречивой информации OD. Для получения полной и непротиворечивой оценки грузового спроса используют методы восстановления матрицы корреспонденций. Допущения, и методы оптимизации могут различаться, но цель всех процедур матричной оценки базового года состоит в получении оптимального соответствия между оценкой и имеющимся набором данных.

С 1970-х гг. разработано несколько методов с использованием различных подходов [1–25]:

1. Формулировка целевой функции в сочетании с использованием лежащей в основе модели распределения: максимальное правдоподобие, минимум дисперсии, минимизация

информации, максимизация энтропии;

2. Использование различных источников данных (прямых и косвенных) и априорной информации, а также включение ограничений в процесс калибровки модели;

3. Включение стохастической составляющей и предположений о характере распределения наблюдаемых данных.

В процессе планирования процессов транспортировки используются все методы оценки матриц OD. Целью данной статьи является сравнительный анализ и исследование возможности применения методов матричного оценивания.

В исследовании проводится сравнительный анализ четырех различных методов:

1. Взвешенная оценка Пуассона в сочетании с методами частичной матричной оценки;

2. Методы максимизации энтропии и минимизации информации;

3. Метод минимизации информации с эластичными ограничениями;

4. Метод явного стохастического оценивания (бинарная калибровочная модель).

### Взвешенная оценка Пуассона

Взвешенная оценка Пуассона основана на двух предположениях: все межзональные транспортные потоки независимы и распределены по Пуассону; прогнозируемое количество поездок является мультиплекативным – произведением некоторых независимых переменных. Максимизация правдоподобия позволяет получить уравнения оценки. Рассмотрим прогнозирующую модель с мультиплекативной формой [14-23]:

$$\hat{T}_{ijm} = C a_i O_i b_j D_j F_m (C_{ijm}) \quad \forall i, j, m \quad (1)$$

с участием:

$$\sum_{jm} \hat{T}_{ijm} = G_i \quad \forall i, \quad \sum_{im} \hat{T}_{ijm} = A_j \quad \forall j,$$

где  $T_{ijm}$  – предполагаемое количество поездок из  $i$  в  $j$  в маршруте  $m$ ;  $C$  – постоянный член;  $a_i, b_j$  – уравновешивающие факторы;  $O_i, D_j$  – полярности (сила генерации и притяжения) зоны  $i$  соответствующей  $j$ ;  $F_m(C_{ijm})$  – функция сдерживания для маршрута  $m$ ;  $C_{ijm}$  – сгенерированная стоимость для OD пары  $ij$  и маршрута  $m$ ;  $G_i$  – генерация поездок в зоне  $i$ ;  $A_j$  – привлекательность поездок в зоне  $j$  (пункты назначения).

Предположим, что

$$a_i O_i = o_i, \quad b_j D_j = d_j \quad (2)$$

$$F_{mk} = F_m (C_{ijm}), \quad (3)$$

где  $C_{ijm}$  – обобщенная стоимость  $k$ .

Подстановка формул (2) и (3) в формулу (1):

$$\hat{T}_{ijm} = C o_i d_j F_{mk} \quad \forall i, j, m. \quad (4)$$

Вероятность наблюдения рейсов  $T_{ijm}$  может быть задана уравнением:

$$\Pr[T_{ijm} | \hat{T}_{ijm}] = \exp(-\hat{T}_{ijm}) (\hat{T}_{ijm})^{\hat{T}_{ijm}} / T_{ijm}!, \quad (5)$$

Число итераций  $T_{ijm}$  предполагается независимым для всех комбинаций  $i, j, m$ . В результате значение логарифмической функции правдоподобия ( $L^*$ ) будет иметь следующий вид:

$$L^* = \ln(L) = \sum_{ij} \ln(\Pr[T_{ijm} | \hat{T}_{ijm}]) \quad (6)$$

Коэффициенты в формуле (1) следует выбирать таким образом, чтобы логарифмическое правдоподобие имело максимальное значение. Подстановка формул (1) и (5) в (6) дает логарифмическую функцию правдоподобия:

$$\begin{aligned} L^* = & \sum_{ij} \left[ -\hat{C} \hat{o}_i \hat{d}_j \hat{F}_{mk} \right] + T_{ijm} \left[ \ln(\hat{C}) + \right. \\ & \left. + \ln(\hat{o}_i) + \ln(\hat{d}_j) + \ln(\hat{F}_{mk}) \right] - \ln(T_{ijm}!). \end{aligned} \quad (7)$$

Максимальное значение логарифмического правдоподобия находится путем установки первых частных производных равными нулю:

$$\frac{\delta L^*}{\delta \hat{Q}_i} = 0 \quad \forall i, \quad \frac{\delta L^*}{\delta \hat{d}_j} = 0 \quad \forall j,$$

$$\frac{\delta L^*}{\delta \hat{F}_{mk}} = 0 \quad \forall m, k, \quad \frac{\delta L^*}{\delta C} = 0.$$

Результатом является набор нелинейных уравнений, с помощью которых коэффициенты могут быть определены итерационным методом (принцип Гаусса-Зейделя):

$$\begin{aligned} \hat{Q}_i &= \frac{\sum_{jm} T_{ijm}}{\sum_{jm} \hat{C} \hat{o}_i \hat{d}_j \hat{F}_{mk}} \quad \forall i, \quad \hat{d}_j = \frac{\sum_{im} T_{ijm}}{\sum_{im} \hat{C} \hat{o}_i \hat{F}_{mk}} \quad \forall j, \\ \hat{F}_{mk} &= \frac{\sum_{\substack{ij \\ C_{ijm} \in K}} T_{ijm}}{\sum_{ij} \hat{C} \hat{o}_i \hat{d}_j} \quad \forall m, k, \quad \hat{C} = \frac{\sum_{ijm} T_{ijm}}{\sum_{ijm} \hat{o}_i \hat{d}_j \hat{F}_{mk}}. \end{aligned}$$

Система уравнений может быть решена в случае отсутствия противоречий в данных. В общем случае это условие не будет выполнено, если используются данные нескольких интервьюеров или опрашиваемые находятся в разных районах.

Взвешенная оценка Пуассона впервые

применялась с начала 1970-х гг. Изначально модель использовалась для оценки функций сдерживания [21], применительно к экспериментальным данным, полученным в процессе наблюдения. Оценка ненаблюдаемых пар OD в матрице может быть получена с использованием методов частичной матрицы, но применение модели было сопряжено со сложностями получения информации из подсчета статистики дорожного движения. Взвешенная оценка Пуассона также используется для анализа многомерных матриц [25].

### Модели максимизации энтропии и минимизации информации

Согласно теории информации, наиболее вероятная матрица – это матрица, полученная максимальным числом способов и удовлетворяющая любым ограничениям, наложенным на систему. Модели максимизации энтропии и минимизации информации эквивалентны; разница между ними состоит в том, что в последней используются некоторые начальные знания о вероятной матрице (априорная матрица). Модель минимизации информации (7) является обобщением модели максимизации энтропии (5). Если известно только общее количество поездок в системе, то метод максимизации энтропии распределит эти поездки равномерно по всем ячейкам матрицы. Введение некоторых ограничений позволит восстановить матрицу корреспонденций более высокой точности. Результатом наложения на энтропию ограничений – общее количество поездок в пункт отправления и назначения, а также на зону и общую функцию расстояния (общую стоимость) является гравитационная модель с двойными ограничениями и экспоненциальной функцией сдерживания. Представляется возможным включить в модель дополнительную информацию: наблюдаемые потоки (количество маршрутов  $v_a$  в каждом направлении). Введение такого ограничения приводит к дополнительному множителю Лагранжа (коэффициенту в модели). Возможно получить точную оценку матрицы поездки без использования информации, необходимой в традиционной гравитационной модели (среднее пройденное расстояние).

Особенностью модели минимизации информации является возможность учета дополнительной информации (априорной матрицы поездок), которая может привести к более ре-

алистичной оценке фактической матрицы поездки. Чем выше точность априорной матрицы, тем точнее будет оценка.

В качестве первого приближения может быть использована как «старая» OD матрица, так и оценка из взвешенной модели Пуассона или модели типа Уилсона.

### Формулировка модели минимизации информации

Согласно теории минимизации информации, наиболее вероятная матрица поездки  $T_{ij}$  удовлетворяет следующему уравнению:

$$L = \min_{T_{ij}} = \sum \sum_{ij} \left[ \hat{T}_{ij} \ln \left( \frac{\hat{T}_{ij}}{T_{ij}} \right) \right]. \quad (8)$$

при условии:

$$\sum \sum_{ij} \left[ \hat{T}_{ij} d_{ij}^a \right] = R_a \quad \forall a, \quad (9)$$

где  $L$  – «расстояние» между матрицами;  $T_{ij}$  – количество поездок от  $i$  до  $j$  (оценивается апостериорно);  $R_a$  – ограничение  $a$  (количество транспортных потоков, общее количество прибытий в зону, распределение продолжительности поездки);  $d_{ij}^a$  доля поездок  $ij$ , на которые распространяется ограничение  $R_a$  (количество поездок  $ij$ , использующих маршрут).

Эта матрица основана на некоторых исходных знаниях (старая матрица, оценка модели).

Если  $T_{ij} = 1$ , то уравнение (8) эквивалентно максимизирующей энтропию формулировке. Минимизация информации уравнения (8) с учетом ограничений (9) дает оценку  $T_{ij}$ . Решение можно получить путем минимизации Лагранжа (если выполняются условия Куна-Таккера):

$$L = \min_{\lambda_a, \hat{T}_{ij}} \left\{ \sum \sum_{ij} \left[ \hat{T}_{ij} \ln \frac{\hat{T}_{ij}}{T_{ij}} \right] - \sum_a \left( \lambda_a \left[ \sum \sum_{ij} \left( \hat{T}_{ij} d_{ij}^a \right) - R_a \right] \right) \right\}.$$

Решение находится путем приравнивания частных производных к нулю:

$$\frac{\delta L}{\delta \hat{T}_{ij}} = 0 \quad \forall ij, \quad \frac{\delta L}{\delta \lambda_a} = 0 \quad \forall a.$$

Уравнение дает:

$$\frac{\delta L}{\delta \hat{T}_{ij}} = 1 + \ln \left( \hat{T}_{ij} \right) - \ln \left( T_{ij} \right) - \sum_a \left( \lambda_a \sum \sum_{ij} d_{ij}^a \right) = 0.$$

Предполагается, что

$$\ln(X_0) = -1, \quad \ln(X_a) = \lambda_a \sum \sum_{ij} d_{ij}^a.$$

Замена в уравнении приводит выражение к виду:

$$\hat{T}_{ij} = T_{ij} x_0 \prod_a X_a \quad \forall i, j. \quad (10)$$

Уравнение (10) показывает, что априорная информация (матрица OD) умножается на ряд коэффициентов  $x_a$ . Каждое ограничение  $R_a$  вводит дополнительный коэффициент  $x_a$  в модель. Важное различие между моделями минимизации информации и максимизации энтропии состоит в том, что в случае большего количества наблюдений  $N$  на пару OD существует положительная корреляция между смещением оценки максимизации энтропии и количеством подсчетов потока. Оценка минимизации информации свободна от смещения.

Рассматриваемая модель имеет ряд особенностей:

1. Объем транспортных потоков  $T_{ij}$  оценивается с использованием модели с коэффициентами (множителями Лагранжа), зависящими от времени и места;

2. Уравнение (8) не определено в случае  $T_{ij} = 0$ . Все ненаблюдаемые данные матрицы поездки  $T_{ij}$  не могут применяться в процессе оценки. Это может стать серьезной задачей при использовании наблюдаемой априорной матрицы, которая содержит, по большей части, нулевые значения. Все ненаблюдаемые пары следует сначала оценить с помощью взвешенной модели Пуассона;

3. Если набор ограничений в уравнении (9) непротиворечив, невозможно найти приемлемое решение. Для того чтобы иметь возможность решить эту задачу, необходимо удалить все несоответствия из данных и оценить матрицу поездок из согласованных потоков. Эта задача часто возникает, если используются данные, при которых пары могут наблюдаться несколько раз.

Для улучшения метода оценки модель максимизации энтропии была расширена несколькими способами, путем включения компонента информации о маршруте, а также введения зависящих от времени матриц поездок.

## Модель минимизации информации с эластичными ограничениями

Применение модели минимизации информации может привести к значительной ее потере информации. Причина этого в стохастических свойствах ограничений (объем транспортных потоков). Все ограничения, включенные в модель, детерминированы. Для решения

задачи потери информации рассмотрим модель с использованием эластичных ограничений вместо фиксированных. Применение ограничений в задаче оптимизации приводит к следующим уравнениям:

$$\sum_{ij} \left( \hat{T}_{ij} d_{ij}^a \right) = S_a \quad \forall a, \quad (11)$$

$$S_a = X_a^{-g_a} R_a, 0 \leq g_a \leq \infty. \quad (12)$$

Таким образом, уравнение (9) заменяется уравнениями (11) и (12). Но в случае  $g_a = 0$ ,  $S_a = R_a$ .

При ограничении  $b$  подстановка уравнений (10) и (11) в (12) дает следующее уравнение:

$$X^{-g_b} R_b = x_b \sum_{ij} \left( T_{ij} X_0 \prod_a \left( x_a \right) d_{ij}^b \right).$$

что после преобразования имеет вид

$$X_b = \left\{ R_b / \sum_{ij} \left( T_{ij} X_0 \prod_a \left( x_a \right) d_{ij}^b \right)^{1/(1+g_b)} \right\}. \quad (13)$$

Показатель степени  $[1/(1+g_b)]$  в уравнении (13) определяется как эластичность ограничения  $b$ . Если эластичность  $[1/(1+g_b)] = 0$ , то  $X_b = 1$ , то ограничение  $b$  не оказывает никакого влияния на оценку модели; если эластичность  $[1/(1+g_b)] = 1$ , то оценка модели будет полностью соответствовать ограничению  $b$ . В последнем случае речь идет о модели минимизации информации.

Особенностью модели с эластичными ограничениями является то, что при правильном выборе значений эластичности потери априорной информации будут значительно снижены. Хотя трудно дать четкое объяснение, какие значения следует присваивать эластичности ограничений, очевидно, что преобладают два фактора:

- аддитивное количество информации;
- достоверность информации.

Значения эластичностей следует выбирать таким образом, чтобы сумма (или взвешенная сумма) для потоков и OD-пар имела минимальное значение. Применение модели минимизации информации с эластичными ограничениями может значительно повысить качество оценки нулевой матрицы с использованием априорной информации и подсчетов транспортных потоков. К недостаткам можно отнести следующее:

1. Каждое наблюдение формулируется как

ограничение и приводит к включению дополнительного коэффициента в модель оценки. Эти коэффициенты зависят от времени и места проведения эксперимента, что исключает возможность использования модели для прогнозирования среднесрочных и долгосрочных изменений;

2. Расчетная матрица OD сильно зависит от значений эластичности. Если эти значения равны 0, априорная матрица не изменится. Значение эластичностей, равное 1, приведет к модели минимизации информации;

3. Доступную информацию, полученную из оборудования учета транспортных потоков, используют для тех пар OD, которые проходят по наблюдаемым участкам. Все остальные OD пары не изменятся. Эту задачу можно решить, используя дополнительную информацию.

### Бинарная калибровочная модель

Использование данных транспортных потоков для целей оценки (калибровки) требует внимания, так как непрерывное изменение транспортных потоков, доступность данных из различных источников (опросы, подсчеты), а также различия в размере выборки и наблюдаемых группах населения могут привести к значительной степени стохастичности (несоответствия в данных). Существуют модели оценки, используемые при наблюдениях со стохастическими свойствами. Как и в энтропийной модели, все коэффициенты калибруются таким образом, чтобы было получено оптимальное соответствие между наблюдаемыми данными и расчетной матрицей. Существенное отличие от модели энтропийного типа заключается в том, что для наблюдения всех ограничений не вводятся дополнительные коэффициенты.

Модель бинарной калибровки основана на предположении, что наблюдаемые данные имеют независимое распределение Пуассона.

Пусть  $T_{ij}$  – доступная априорная информация (старая наблюдаемая OD-матрица). Вместо использования наблюдаемой матрицы OD предпочтительно использовать оценки  $T_{ij}$  (с применением взвешенной модели Пуассона). Преимущество использования оценок – матрица  $T_{ij}$  не будет содержать нулевых значений. Аналогичное уравнение (4) для матрицы можно сформулировать:

$$\hat{T}_{ijm} = C o_i d_j F_k \quad \forall i, j,$$

где  $T_{ijm}$  – количество поездок от  $i$  до  $j$  (оценка модели или априорная матрица);  $C$  – постоянный

член;  $o_i = a_i O_i$  – произведение коэффициента балансировки и полярности зоны  $i$ ;  $d_j = b_j D_j$  – произведение коэффициента уравновешивания и полярности зоны  $j$ ;  $F_k$  – значение функции сдерживания для обобщенного класса затрат  $k$  и  $c_{ij}k$ ;  $Y_a$  – информация наблюдений  $a$  (отправления, прибытия по зонам, подсчет транспортных потоков, распределение расстояния поездки);  $d_{ij}^a$  – двоичная переменная, указывающая на то, принадлежит ли OD-пара  $ij$  наблюдению  $a$  ( $d_{ij}^a = 1$ ) или нет ( $d_{ij}^a = 0$ ). При этом

$$Y_a = \sum_i \sum_j (\hat{T}_{ij} d_{ij}^a)$$

Связь между оценкой матрицы базисного года  $T_{ij}$  и априорной матрицей представлена как

$$\hat{T}_{ij} = C o_i d_j F_k T_{ij}, \quad (14)$$

где  $i \in I, j \in J$  и  $k \in K$ .

Предыдущая формулировка подразумевает, что наборы уравновешивающих факторов и дискретные значения функции сдерживания изменяются; но общий вид модели остается неизменным.

Предполагая, что наблюдения  $Y_a$  независимы и вероятность  $L$  распределения Пуассона может быть определена следующим образом:

$$\Pr[Y_a | \hat{Y}_a] = \exp(-\hat{Y}_a) \hat{Y}_a^{(y_a)} / Y_a!;$$

$$L = \prod_a \Pr[Y_a | \hat{Y}_a]$$

Логарифм вероятности:

$$\ln(L) = L^* = -\sum_a \hat{Y}_a + \sum_a [Y_a \ln(\hat{Y}_a)] - \sum_a [\ln(Y_a!)]$$

Максимизируем:

$$L_1^* = -\sum_a (\hat{Y}_a) + \sum_a [Y_a \ln(Y_a)],$$

что позволяет получить следующие уравнения:

$$\sum_a \left[ \left( \frac{Y_a}{\hat{Y}_a} - 1 \right) \frac{\delta Y_a}{\delta O_i} \right] = 0 \quad \forall I,$$

$$\sum_a \left[ \left( \frac{Y_a}{\hat{Y}_a} - 1 \right) \frac{\delta Y_a}{\delta d_j} \right] = 0 \quad \forall J,$$

$$\sum_a \left[ \left( \frac{Y_a}{\hat{Y}_a} - 1 \right) \frac{\delta Y_a}{\delta F_k} \right] = 0 \quad \forall K, \quad \sum_a \left[ \left( \frac{Y_a}{\hat{Y}_a} - 1 \right) \frac{\delta Y_a}{\delta C} \right] = 0.$$

Значения  $O_i, d_j, F_k$  и  $C$  определяются итеративно (аналогично принципу Гаусса – Зейделя).

Преимущество использования бинарной модели калибровки по сравнению с моделью минимизации информации с эластичными ограничениями

ничениями, заключается в том, что не использует обследований участков или зон (только ОД-модель).

Обзор основных характеристик методов оценки  
Overview of the main characteristics of assessment methods

Характеристика типа модели	1	2	3	4
Оценка ненаблюдаемых пар	Да	Нет	Нет	Да
Допустимость противоречивости информации	Нет	Нет	Да	Да
Возможность использования наблюдаемых данных	Нет	Да	Да	Да
замена пар матрицы корреспонденций	–	Только	Только	Все пары
Потеря информации	Нет	Да	–	Нет
Использование модели для среднесрочных и долгосрочных прогнозов	Да	Нет	Нет	Да
Сложная структура модели	Нет	Нет	Нет	Да

Примечание: 1 – взвешенная оценка Пуассона; 2 – модель максимизации энтропии и минимизации информации; 3 – модель минимизации информации с эластичными ограничениями; 4 – бинарная калибровочная модель.

Note: 1-weighted Poisson assessment; 2-entropy maximization and information minimization model; 3-information minimization model with elastic constraints; 4-binary calibration model.

зуются дополнительные коэффициенты. Это позволяет использовать модель для составления среднесрочных и долгосрочных прогнозов.

В статье рассмотрено четыре модели, используемых для оценки матрицы корреспонденций: взвешенная оценка Пуассона; модели максимизации энтропии и минимизации информации; модель минимизации информации с эластичными ограничениями; модель бинарной калибровки.

В исследовании представлены сводные данные об основных характеристиках моделей, и сделаны основные выводы о возможном применении всех обсуждаемых методов. Сведем основные характеристики моделей в табл.

## Заключение

Рассмотрено четыре модели, которые используются для оценки ОД-матрицы.

Взвешенная модель Пуассона подходит для оценки функций сдерживания и матрицы базового года при использовании информации

информации). Матричная оценка базового года удобна при минимизации информации.

Модели максимизации энтропии и минимизации информации имеют некоторые недостатки: не допускается противоречивая информация; все коэффициенты в модели зависят от времени и места, что исключает возможность использования моделей для составления среднесрочных и долгосрочных прогнозов; использование моделей приводит к потере информации.

Потери информации можно избежать, используя модель с эластичными ограничениями вместо фиксированных.

Модель бинарной калибровки не имеет ни одного из вышеприведенных недостатков, однако обладает довольно сложной структурой.

Результаты сравнительного анализа позволят осуществлять выбор модели для оценки грузового спроса в зависимости от поставленных целей исследования и производить его с максимальной эффективностью.

## Список литературы

1. Лебедева О.А., Антонов Д.В. Моделирование грузовых матриц корреспонденций гравитационным и энтропийным методами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5 (100). С. 118–122.
2. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Моделирование грузовых перевозок в транспортной сети // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2016. № 10. С. 182–184.
3. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Развитие городских грузовых систем с учетом концепции городского планирования / Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 1. С. 244–247.
4. Полтавская Ю.О. Повышение эффективности цепи поставок с учетом оптимального местоположения распределительного центра // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2021. № 15. С. 164–167.
5. Полтавская Ю.О. Оптимизация транспортной сети на основе минимума общих затрат на доставку грузов // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. № 13. С. 178–183.
6. Шаров М.И., Михайлов А.Ю., Дученкова А.В. Пример оценки транспортной доступности с использованием программного продукта PTV «VISUM» // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2013. № 1(4). С. 133–138.

7. Лебедева О.А. Анализ проектирования транспортных зон на основе моделирования сети // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. № 13. С. 172-177.
8. Гозбенко В.Е., Крипак М.Н., Иванков А.Н. Совершенствование транспортно-экспедиционного обслуживания грузовладельцев. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 176 с.
9. Гозбенко В.Е., Иванков А.Н., Колесник М.Н., Пашкова А.С. Методы прогнозирования и оптимизации транспортной сети с учетом мощности пассажиро и грузопотоков // Депонированная рукопись № 330-В2008 17.04.2008.
10. Полтавская Ю.О. Основные факторы, влияющие на выбор способа транспортировки // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2021. № 8. С. 191-192.
11. Lebedeva, O., Kripak, M., Gozbenko, V. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. 427–433.
12. R. Hamerslag and FI. C. Huisman. Binaire Calibratie. De Scbuing Van Coefficiënten in een Verkeersmodel Met Gebrickmaking van Verschillende Soorten Waarnemingen. *Verkeerskunde*, No. 4, 1978, pp. 166-168.
13. J. G. Smit. Het Schatten van Herkomst-bestemmings Matrices: de Maximum Likelihood Versus de Minimum Vari- ance Methode. In *Proceedings Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk*, 1981, pp. 737-741.
14. H.J. Van Zuylen. The Information Minimising Method: Its Validity and Applicability to Transportation Planning. In *New Developments in Modelling Travel Demand and Urban Systems* (G. R. M. Jansen et al., eds.) Saxon House, 1979, pp. 344-371.
15. M. G. H. Bell. The Estimation of Junction Turning Volumes from Traffic Counts: The Role of Prior Information. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 25, No. 5, 1984, pp. 279- 283.
16. L. G. Willumsen. Estimating Time-dependent Trip Matrices from Traffic Counts. *Proceedings of 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 1984, pp. 377- 411.
17. A. G. Wilson. The Use of Entropy Maximising Models in the Theory of Trip Distribution, Modal Split and Route Split. *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 2, No. 1, 1969, pp. 108-126.
18. S. Nguyen. On the Estimation of an O-D Trip Matrix by Equilibrium Methods Using Pseudo-delay Functions. CRT publ. 81. University de Montreal, Centre de Recherche sur Les Transports Montreal, Quebec Canada, 1978.
19. R. Hamerslag. Het Schatten van Herkomst- en Bestemmings matrices m.b.v. Schijnbaar Tegenstrijtige Waamemiogen. *Proceedings Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk* 1980, pp. 711-714.
20. A. G. Wilson. A Statistical Theory of Spatial Distribution Models. *Transportation Research*, 1967, pp. 253-269.
21. M. J. Maher. Bias in the Estimation of O-D Hows from Link Counts. Paper presented at UTSO conference, Sheffield, United Kingdom, 1987.
22. M. F. A. M. Van Maarseveen and C. J. Ruygrov. Het Oebruik van Route-informatie Voor het Opstellen van HB-matrices. *Proceedings Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk*, 1982, pp. 399-420.
23. M. F. A. M. Van Maarseveen et al. Estimating O-D Tables Using Empirical Route Choice Information with Application to Bicycle Traffic. Paper presented at 64th Annual Meeting, TRB, January 1985.
24. T. Van Vuren. Het Schatten van een Herkomst- en Bestemmingstabel: Een Overzicht. Thesis. Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 1985.
25. E. Heere and M. C. Huisman. Toepassing van de binaire Calibratiemethode in Zaanstad. *Verkeerskunde*, 1978, pp. 239-242.
26. 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, 19(3), 229-242.
27. Kuzmin O. V., Khomenko A. P., Artyunin A. I. Discrete model of static loads distribution management on lattice structure. *Advances and Applications in Discrete Mathematics*, 2018, 19(3), 183-193.
28. M. C. Ellis and H. Van Ammers. Forecasting Using Cordon Surveys in the Egyptian National Transportation Study. *Proceedings of 9th Summer Annual Meeting*, PTRC, Warwick, England, 1981.

## References

1. Lebedeva O.A., Antonov D.V. Modelirovanie gruzovykh matris korrespondentsii gravitatsionnym i entropiinym metodami [Modeling of cargo correspondence matrices by gravity and entropy methods]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2015, no 5 (100), pp. 118-122.
2. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Modelirovanie gruzovyh perevozok v transportnoi seti [Modeling of freight transport in the transport network]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Angarsk State Technical University]. 2016, no 10, pp. 182-184.
3. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Razvitiye gorodskikh gruzovyh sistem s uchetom kontseptsii gorodskogo planirovaniya [Development of urban freight systems taking into account the concept of urban planning]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Angarsk State Technical University]. 2016, vol. 1, no 1, pp. 244-247.
4. Poltavskaya Yu.O. Povysheniye effektivnosti tsepi postavok s uchetom optimal'nogo mestopolozheniya raspredelitel'nogo tsentra [Improving the efficiency of the supply chain, taking into account the optimal location of the distribution center]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Angarsk State Technical University]. 2021, no 15, pp. 164-167.
5. Poltavskaya Yu.O. Optimizatsiya transportnoi seti na osnove minima obshchikh zatrata na dostavku gruzov [Optimization of the transport network based on the minimum total cost of cargo delivery]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Angarsk State Technical University]. 2019, no 13, pp. 178-183.
6. Sharov M.I., Mikhailov A.Yu., Duchenkova A.V. Primer otsenki transportnoi dostupnosti s ispol'zovaniem programmnogo produkta PTV «VISUM» [An example of assessing transport accessibility using the PTV «VISUM» software product]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedyzhimost'* [Bulletins of universities. Investment. Building. Realty]. 2013, no 1(4), pp. 133-138.

7. Lebedeva O.A. Analiz proektirovaniya transportnykh zon na osnove modelirovaniya seti [Analysis of the design of transport zones based on network modeling]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Angarsk State Technical University]. 2019, no 13, pp. 172-177.
8. Gozbenko V.E., Kripak M.N., Ivankov A.N. Sovershenstvovanie transportno-ekspeditsionnogo obsluzhivaniya gruzovladel'sev [Improvement of freight forwarding services for cargo owners]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2011. 176 p.
9. Gozbenko V.E., Ivankov A.N., Kolesnik M.N., Pashkova A.S. Metody prognozirovaniya i optimizatsii transportnoi seti s uchetom moshchnosti passazhiro i gruzopotokov [Methods of forecasting and optimization of the transport network taking into account the capacity of passenger and cargo flows]. *Deponirovannaya rukopis'* [Deposited manuscript], no 330 17.04.2008.
10. Poltavskaya Yu.O. Osnovnye faktory, vliyayushchiye na vybor sposoba transportirovki [The main factors influencing the choice of transportation method]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tehnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technological progress]. 2021, no 8, pp. 191-192.
11. Lebedeva, O., Kripak, M., Gozbenko, V. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. 427–433.
12. R. Hamerslag and FI. C. Huisman. Binaire Calibratie. De Scbaving Van Coefficiënten in een Verkeersmodel Met Gebrickmaking van Verschillende Soorten Waarnemingen. *Verkeerskunde*, No. 4, 1978, pp. 166-168.
13. J. G. Smit. Het Schatten van Herkomst-bestemmings Matrices: de Maximum Likelihood Versus de Minimum Vari- ance Methode. In *Proceedings Colloquium Vervoersplano logisch Speurwerk*, 1981, pp. 737-741.
14. H. J. Van Zuylen. The Information Minimising Method: Its Validity and Applicability to Transportation Planning. In *New Developments in Modelling Travel Demand and Urban Systems* (G. R. M. Jansen et al., eds.) Saxon House, 1979, pp. 344-371.
15. M. G. H. Bell. The Estimation of Junction Turning Volumes from Traffic Counts: The Role of Prior Information. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 25, No. 5, 1984, pp. 279- 283.
16. L. G. Willumsen. Estimating Time-dependent Trip Matrices from Traffic Counts. *Proceedings of 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 1984, pp. 377- 411.
17. A. G. Wilson. The Use of Entropy Maximising Models in the Theory of Trip Distribution, Modal Split and Route Split.. *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 2, No. 1, 1969, pp. 108-126.
18. S. Nguyen. On the Estimation of an O-D Trip Matrix by Equilibrium Methods Using Pseudo-delay Functions. CRT publ. 81. University de Montreal, Centre de Recherche sur Les Transports Montreal, Quebec Canada, 1978.
19. R. Hamerslag. Het Schatten van Herkomst- en Bestemmings matrices m.b.v. Schijnbaar Tegenstrijctige Waamemiogen. *Proceedings Colloquium Vervoersplano/ogisch SpeelInverk* 1980, pp. 711-714.
20. A. G. Wilson. A Statistical Theory of Spatial Distribution Models. *Transportation Research*, 1967, pp. 253-269.
21. M. J. Maher. Bias in the Estimation of O-D Hows from Link Counts. Paper presented at UTSO conference, Sheffield, United Kingdom, 1987.
22. M. F. A. M. Van Maarseveen and C. J. Ruygrok. Het Oebruik van Route-informatie Voor het Opstellen van HB-matrices. *Proceedings Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk*, 1982, pp. 399-420.
23. M. F. A. M. Van Maarseveen et al. Estimating O-D Tables Using Empirical Route Choice Information with Application to Bicycle Traffic. Paper presented at 64th Annual Meeting, TRB, January 1985.
24. T. Van Vuren. Het Schatten van een Herkomst- en Bestemmingstabel: Een Overzicht. Thesis. Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 1985.
25. E. Heere and M. C. Huisman. Toepassing van de binaire Calibratiemethode in Zaanstad. *Verkeerskunde*, 1978, pp. 239-242.
26. 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, 19(3), 229-242.
27. Kuzmin O.V., Khomenko A.P., Artyunin A.I. Discrete model of static loads distribution management on lattice structure. *Advances and Applications in Discrete Mathematics*, 2018, 19(3), 183-193.
28. M. C. Ellis and H. Van Ammers. Forecasting Using Cordon Surveys in the Egyptian National Transportation Study. *Proceedings of 9th Summer Annual Meeting*, PTRC, Warwick, England, 1981.

### Информация об авторах

**Лебедева Ольга Анатольевна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: kravhome@mail.ru

**Гозбенко Валерий Ерофеевич**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

### Information about the authors

**Ol'ga A. Lebedeva**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Department «Management of Automobile Transport», Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: kravhome@mail.ru

**Valeriy E. Gozbenko**, Doctor of Engineering Science the Full Professor of the Department «Management of automobile transport», Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

## Решение задачи маршрутизации в транспортной сети с использованием псевдополиномиальной модели

Ю. О. Полтавская✉

Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

✉ juliapolavskaya@mail.ru

### Резюме

Решение задачи маршрутизации транспортных средств заключается в построении маршрутов от автотранспортного предприятия к определенному количеству потребителей, расположенных в географическом пространстве. Разработка эффективных систем распределения позволяет минимизировать затраты на доставку, что является актуальным направлением совершенствования работы предприятия в современных экономических условиях, с целью обеспечения устойчивых транспортных связей между потребителями и для создания конкурентоспособности на рынке транспортных услуг. В статье рассматривается задача маршрутизации транспортных средств при обслуживании потребителей на нескольких маршрутах с учетом временных окон. Считается, что транспортное средство может быть назначено для работы более чем на одном маршруте за период планирования (рабочий день). Алгоритм решения задачи является итеративным и основан на использовании модели псевдополиномиального сетевого потока, узлы которой представляют моменты времени, а дуги – возможные маршруты транспортных средств. Алгоритм был протестирован на наборе данных из пяти потребителей и двух транспортных средств. Также стоит отметить, что вместимость транспортных средств является переменной, оказывающей существенное влияние на получение оптимального варианта решения задачи. В дальнейших исследованиях, направленных на поиск методов решения задачи маршрутизации, рекомендуется учитывать значение постоянных затрат, связанных с использованием транспортных средств, поскольку, оно оказывает значительное влияние на функцию минимизации затрат в случае применения на практике. Предлагаемый метод позволяет отследить данный момент, поскольку математическая модель и алгоритм принимают во внимание стоимостные затраты в целевой функции.

### Ключевые слова

задача маршрутизации, псевдополиномиальная модель, оптимизационная задача, целочисленное программирование, обслуживание потребителей

### Для цитирования

Полтавская Ю. О. Решение задачи маршрутизации в транспортной сети с использованием псевдополиномиальной модели / Ю. О. Полтавская // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 95–103. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).95-103

### Информация о статье

поступила в редакцию: 09.02.2022 г.; поступила после рецензирования: 18.03.2022 г.; принята к публикации: 22.03.2022 г.

## Solution problem of routing in transport network using pseudopolynomial model

Ju. O. Poltavskaya✉

Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

✉ juliapolavskaya@mail.ru

### Abstract

Solution of the vehicle routing problem lies in building routes from a motor transport enterprise to a certain number of consumers located in a geographic space. Development of efficient distribution systems allows minimizing delivery costs, which is an important trend in improving the work of an enterprise under present-day economic conditions, in order to provide sustainable transport links between consumers to ensure competitiveness in the transport services market. The article considers the problem of vehicle routing when serving consumers on several routes, taking into account time windows. It is considered that a vehicle can be assigned to work on more than one route during the planning period (working day). The algorithm for solving the problem is iterative based on the use of a pseudopolynomial network flow model where nodes represent points in time with the arcs showing the possible routes of vehicles. The algorithm was tested on a dataset of five consumers and two vehicles. It is also worth noting that the capacity of vehicles is a variable that has a significant impact on obtaining the optimal solution to the problem. In further research aimed at finding methods for solving the routing problem, it is recommended to take into account the value of fixed costs associated with the use of vehicles, since it has a significant impact on the cost minimization function if applied in practice. The proposed method makes it possible to consider this moment since the mathematical model and algorithm take account of the expenses in the objective function.

**Keywords**

routing problem, pseudopolynomial model, optimization problem, integer programming, customer service

**For citation**

Poltavskaya Ju. O. Resheniye zadachi marshrutizatsii v transportnoi seti s ispol'zovaniyem psevdopolinomial'noi modeli [Solution problem of routing in transport network using pseudopolynomial model]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2022, No. 1 (73), pp. 95–103. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).95-103

**Article Info**

Received: 09.02.2022; revised: 18.03.2022; accepted: 22.03.2022.

**Введение**

Выбор маршрута транспортного средства (ВМТС) представляет собой комбинаторную оптимизационную задачу планирования пути следования для обьезда определенного количества потребителей, которым должны доставить и/или от которых необходимо получить требуемое количество груза. Задача состоит в том, чтобы найти наилучший набор маршрутов в соответствии с соблюдением эксплуатационных ограничений транспортных средств. Целевой функцией может быть минимизация транспортных расходов, максимизация количества обслуженных потребителей или сочетание этих факторов [1–6]. Ее можно рассматривать как обобщение известной комбинаторной задачи коммивояжера, которую можно описать как выбор маршрута для одного транспортного средства без учета требований потребителей. Методы ее решения включают несколько эвристических и метаэвристических подходов, а также некоторые точные методы, чаще всего основанные на методе «ветвей и границ» [7–9]. Классическую версию ВМТС обычно называют задачей маршрутизации с учетом загрузки, поскольку подвижной состав имеет ограниченную вместимость (грузоподъемность) [10–13].

Наиболее известным вариантом классической задачи выбора маршрута является ВМТС с временными окнами [14, 15]: существует определенный период времени, в течение которого каждый из потребителей должен быть обслужен. Наряду с расстояниями между всеми потребителями и автотранспортным предприятием (АТП) необходимо учитывать время в пути и продолжительность обслуживания. Иной вариант решения рассматриваемой задачи представлен в литературе авторами [16–18], где допускается, что транспортное средство может быть назначено для работы более чем на одном маршруте за период планирования, и обозначается как задача выбора маршрута транспортного средства с несколькими рейсами.

В данной статье рассматривается задача маршрутизации транспортных средств с временными окнами и множественными маршрутами. Несмотря на очевидную практическую значимость (например, доставка скоропортящихся грузов), этот вариант классической задачи не является предметом большого количества исследований. Алгоритм задачи, основанный на модели псевдополиномиального сетевого потока, узлы которого представляют собой дискретные моменты времени, а решение состоит из набора путей, каждый из которых представляет собой рабочий день, позволяет определить последовательности маршрутов, назначенных одному транспортному средству за конкретный период планирования. Особенность данной модели заключается в том, что ее размер зависит от продолжительности рабочего дня. Моменты времени, рассматриваемые в модели, являются целыми, поэтому, когда время в пути не представляет собой целое число, предлагается использовать процедуры округления, которые позволяют получить нижнюю границу значения. Затем модель встраивается в алгоритм, который итеративно добавляет новые моменты времени в модель сетевого потока и повторно оптимизирует ее до тех пор, пока не будет доказано, что найденное решение реализуемо. Минимизация транспортных расходов – это первоочередная задача поиска кратчайшего пути с ограничениями ресурсов, сформулированная в виде графа, дуги которого представляют маршруты транспортных средств, генерирующихся априори, поскольку существует дополнительное ограничение в продолжительности движения, из-за чего количество возможных маршрутов резко сокращается.

**Модель целочисленного программирования для решения задачи маршрутизации**

Для постановки задачи определим, что имеется одно АТП, которое является началом и концом всех маршрутов транспортных средств.

Парк подвижного состава однороден. Все транспортные средства имеют вместимость  $Q$  единиц. Предполагается, что в парке имеется  $K$  свободных автомобилей. Множество потребителей представлено числом  $N = \{1, \dots, n\}$ . Паре  $i, j \in N \cup \{A\}$  соответствует определенное расстояние  $d_{ij}$  и время в пути  $t_{ij}$ . Каждый  $i$ -ый потребитель характеризуется спросом  $q_i$ , доходом  $g_i$ , временем обслуживания  $s_i$  и временным окном  $[a_i, b_i]$ , где  $a_i$  – самое раннее время, а  $b_i$  – самое позднее время начала обслуживания  $i$ -го потребителя. Время начала работы АТП определено как  $s_0 = 0$ , и все маршруты транспортных средств должны соответствовать временному окну АТП  $[a_0, b_0]$ , т. е. ни одно транспортное средство не может покинуть предприятие до  $a_0$  или прибыть в него после  $b_0$ . Это временное окно представляет собой продолжительность рабочего дня  $W$ . Примем, что

$$b_i + s_i + d_{i0} \leq b_0 \quad \forall i \in N_r.$$

Каждое транспортное средство может пройти несколько маршрутов в течение рабочего дня. Маршрут  $r$  определяется последовательностью посещений подмножества клиентов  $N_r \in N$ . Он реализуем, если сумма требований всех потребителей, принадлежащих  $N_r$ , не превышает вместимости (грузоподъемности) транспортного средства и если последовательность посещений такова, что можно посетить каждого потребителя в пределах установленного временного окна. Считается, что обслуживание всех потребителей на маршруте не может начаться позже, чем через время  $t_{max}$  после начала маршрута. Обозначим множество всех допустимых маршрутов  $R$ . Для каждого маршрута также необходимо учитывать время на подготовительно-заключительные операции. Прежде чем осуществить выезд из АТП для выполнения маршрута  $r$ , транспортному средству требуется период времени  $\beta \sum_{i \in N_r} s_i$  для загрузки, при этом  $\beta \in R^+$ . Посещение всех пунктов на маршруте может оказаться невозможным из-за ограничения количества доступных транспортных средств, однако предпочтительным является обслуживание наибольшего количества потребителей.

Задача может быть сформулирована в виде полного ориентированного графа

$$G = (V, A),$$

где  $V = N \cup \{o\}$  – множество узлов;  $A = \{(i, j) : i, j \in V\}$  – множество дуг.

Бинарные переменные  $x_{ij}^r$  и  $y_i^r$  определяют, соответственно, принадлежат ли дуга  $(i, j)$  и  $i$ -ый потребитель маршруту  $r$ , тогда как бинарная переменная  $z_{rs}$  определяет транспортное средство, которое выполняет маршрут  $r$  в свой рабочий день. Обозначение  $r < s$  указывает, что одно и то же транспортное средство назначается для прохождения маршрута  $s$  после маршрута  $r$ . Переменная  $t_i^r$  представляет момент начала обслуживания  $i$ -ого потребителя, если он обслуживается маршрутом  $r$ , а  $t_0^r$  и  $t_0'^r$  представляют время начала и окончания маршрута  $r$  соответственно:

$$\min \sum_{r \in R} \sum_{i, j \in A} d_{ij} x_{ij}^r - \alpha \sum_{r \in R} \sum_{i \in N} g_i y_i^r, \quad (1)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ih}^r - \sum_{j \in V} x_{hj}^r = 0 \quad \forall h \in N, \forall r \in R, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{oi}^r = 1 \quad \forall r \in R, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{io}^r = 1 \quad \forall r \in R, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} q_i y_i^r \leq Q \quad \forall r \in R, \quad (5)$$

$$t_i^r + s_i + t_{ij} - M(1 - x_{ij}^r) \leq t_j^r, \quad (6)$$

$$a_i y_i^r \leq t_i^r \leq b_i y_i^r \quad \forall i \in N, \forall r \in R, \quad (7)$$

$$t_0^s + M(1 - z_{rs}) \geq t_0'^r + \beta \sum_{i \in N} s_i y_i^s, \quad (8)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in R | r < s} z_{rs} \geq |R| - K. \quad (9)$$

Целевая функция (1) отражает, что предпочтительнее обслуживание наибольшего количества потребителей. Для того, чтобы модель была действительной, для константы  $\alpha$  должно быть установлено значение. Ограничения (2)–(4) являются ограничениями сохранения потока, а (5) и (9) определяют вместимость и количество транспортных средств. Период обслуживания потребителей должен соответствовать определенному временному окну и выражается формулой (7). Каждые два потребителя при последовательном обслуживании на одном маршруте должны иметь совместимое время (6), также, как и два последовательных маршрута, выполняемых одним и тем же транспортным средством (8) [19–21].

Основой алгоритма «ветвей и границ» для решения задачи маршрутизации является генерация столбцов, где каждый из них представляет рабочий день транспортного средства  $w$ . Продолжительность рабочего дня складывается из последовательности маршрутов, назначенных транспортному средству, которые необходимо выполнить в течение установленного планового периода.

Пусть  $\Omega$  будет набором допустимых рабочих дней,  $d_w$  и  $g_w$  – суммарное расстояние перевозки и транспортные затраты за рабочий день  $w \in \Omega$  соответственно,  $a_{iw}$  – бинарный коэффициент, указывающий, обслуживается ли  $i$ -й потребитель в течение рабочего дня  $w$ , тогда:

$$\min \sum_{w \in \Omega} (d_w - \alpha g_w) x_w, \quad (10)$$

$$\sum_{w \in \Omega} a_{iw} x_w \leq 1, \quad i \in V, \quad (11)$$

$$\sum_{w \in \Omega} x_w \leq K, \quad (12)$$

$$x_w \in \{0, 1\} \quad w \in \Omega$$

Целевая функция (10) учитывает, что потребитель может быть не посещен в случае нехватки времени или отсутствия свободного транспортного средства. Выражение (11) устанавливает ограничение посещения не более одного раза каждого потребителя. Количество рабочих дней в решении не может превышать количество доступных транспортных средств (12). Решение задачи формулируется как поиск кратчайшего пути с ограничениями ресурсов в заданном графе, узлы которого представляют маршруты транспортных средств, а дуги – пары последовательных маршрутов. Все допустимые маршруты генерируются заранее.

### Псевдополиномиальная модель сети

В модели сетевого потока в решении задач маршрутизации переменные представляют возможные маршруты транспортных средств, которые предварительно генерируются, затем решается целочисленная модель с учетом всех ее переменных. Поскольку узлы графа представляют моменты времени, требуется дискретизация времени.

Маршрут  $r \in R$  может быть допустимым, если он начинается в разные моменты времени. Поэтому для каждого маршрута  $r$  считаем, что существует несколько маршрутов  $r_i$ , по одному на каждый возможный момент отправления  $t$ . Продолжительность маршрута  $r$   $\sigma_r$  различна для моментов отправления, так как время ожидания для обслуживания потребителей может различаться.

Пусть  $(i_1, \dots, i_{|Nr|})$  – последовательность потребителей, посещенных на маршруте  $r \in R$ . Первый возможный момент времени для завершения маршрута  $r$  будет равен

$$T_r^- = \theta_{i|Nr|} + s_{i|Nr|} + t_{i|Nr|o},$$

где  $\theta_{i|Nr|}$  – первый возможный момент начала обслуживания последнего потребителя  $i_{|Nr|}$  на маршруте  $r$ .

Можно вычислить  $T_r^-$ , полагая, что

$$\theta_{ih} = \max \{ \theta_{ih-1} + s_{ih-1} + t_{ih-1}, a_{ih} \}$$

для  $h \in \{1, \dots, |N_r|\}$  с  $\theta_{i0} = a_0$ .

Это означает, как показано на рис. 1, что начало маршрута  $r$  в любой момент времени

$$t_r^* \leq T_r^- = \theta_{i1} - t_{o1}$$

предполагает его завершение в момент времени  $T_r^+$ .

Аналогично, последний возможный момент времени для завершения маршрута  $r$  будет равен:

$$T_r^+ = \varphi_{i|Nr|} + s_{i|Nr|} + t_{i|Nr|o},$$

где  $\varphi_{i|Nr|}$  – последний возможный момент нача-

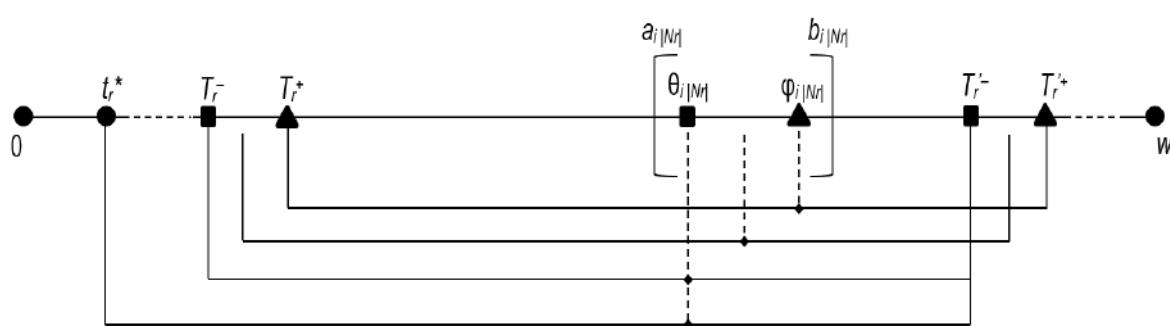


Рис. 1. Начальные и конечные моменты времени на маршруте  $r$

Fig. 1. Initial and final moments on the route  $r$

ла обслуживания потребителя  $i_{|N_r|}$  на маршруте  $r$ , а  $\varphi_{ih} = \min \{\varphi_{ih-1} + s_{ih-1} + t_{ih-1}, b_{ih}\}$  для  $h \in \{1, \dots, |N_r|\}$  с  $\varphi_{i0} = b_0$ .

Начало маршрута в любой момент после  $T_r^+ = \varphi_{il} - t_{oil}$  невозможно, поскольку не учитывается хотя бы одно из временных окон для обслуживания потребителей. Если маршрут  $r$  начинается во временном интервале  $[T_r^-, T_r^+]$ , то он будет иметь минимальную продолжительность, так как время ожидания сведено к минимуму. Для каждого  $r \in R$  интервал  $[T_r^-, T_r^+]$  вычисляется, как описано выше. Количество различных допустимых маршрутов для рассмотрения:

$$\sum_{r \in R} \left[ \frac{T_r^+ - T_r^- + 1}{U} \right],$$

в единицу времени  $U$ , принимая  $U = 1$ .

В модели каждый рабочий день соответствует пути в ациклическом ориентированном графе  $\Pi = (\Delta, \Psi)$ . Множество его вершин  $\Delta = \{0, 1, \dots, W\}$  представляет дискретные моменты времени от 0 до продолжительности рабочего дня  $W$  и  $\Psi = \{(u, v)^r : 0 \leq u < v \leq W, u \in [T_r^-, T_r^+], v = u + \sigma_r, r \in R\} \cup \{(u, v)^0 : 0 \leq u < v \leq W, v = u + 1\}$  представляет набор дуг.

Дуги соответствуют либо допустимым маршрутам транспортных средств, либо периодам ожидания. Дуги времени ожидания представляют моменты времени рабочего дня, когда транспортное средство находится в АТП. В модели корректируется момент времени начала каждого маршрута  $r \in R$   $\beta \sum_{i \in N_r} s_i$  за предшествующие моменты времени для учёта продолжительности загрузки транспортного средства.

Модель формулируется как задача о минимальном потоке. Количество ограничений полиномиально по значению  $W$ , количество переменных полиномиально по допустимым маршрутам, ограниченное константой, зависящей от параметра  $t_{max}$ . Поэтому модель имеет псевдополиномиальное количество переменных и ограничений.

Таблица 1. Исходные данные  
Table 1. Input data

Потребитель, $i$	Координаты, $(x_i, y_i)$	Временное окно, $[a_i, b_i]$	Спрос, $q_i$	Время обслуживания, $s_i$
1	(1, 0)	[5, 6]	1	2
2	(0, 1)	[12, 15]	7	2
3	(1, 2)	[15, 18]	1	2
4	(3, 1)	[7, 9]	2	2
5	(2, 3)	[10, 15]	3	2

Расстояние между двумя потребителями равно евклидову. Представлен граф сетевого потока, сгенерированный для рис. 2, оптимальное решение – на рис. 3. В этом решении  $z = 2$  и, требуется два транспортных средства,  $K_1$  и  $K_2$ . Судя по графу решения (рис. 3), каждое из транспортных средств за свой рабочий день должно пройти два маршрута. Одно из транспортных средств ( $K_1$ ) будет выполнять маршруты, обслуживая потребителей 2, 3 и 4. Загрузка транспортного средства для выполнения маршрута  $b$  начнется в момент времени 3,44, прибытие в АТП – 12,16, ожидание 0,04 момента времени, и повторная загрузка для маршрута  $e$  со-

стоится в момент времени 12,20, окончание работы на маршрутах и прибытие в АТП в момент времени 21,65. Второе транспортное средство обслуживает потребителей 1 и 5. Загрузку для выполнения маршрута  $f$  начинается в момент времени 3,60, прибытие в АТП – в 8,00, ожидание 2,99 момента времени для загрузки для маршрута  $a$  (момент времени 10,99), окончание работы на маршрутах в момент времени 20,60.

Возможные маршруты обслуживания всех потребителей отражены в табл. 2. При реализации алгоритма, описанного выше, все пункты маршрута посещаются однократно, и за рабочий день обслуживаются все потребители.

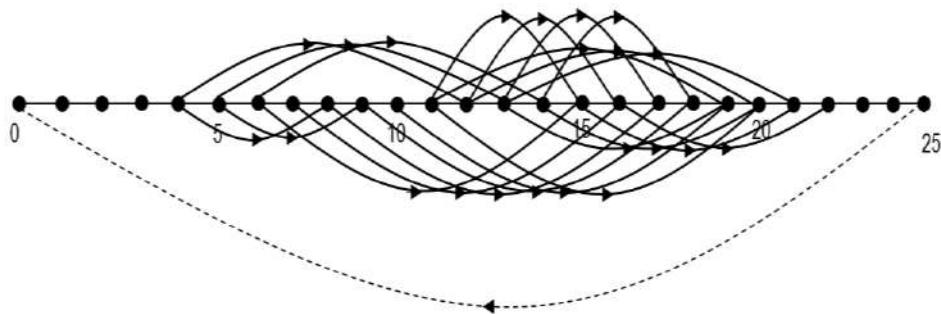


Рис. 2. Граф сетевого потока  
Fig. 2. Network flow graph

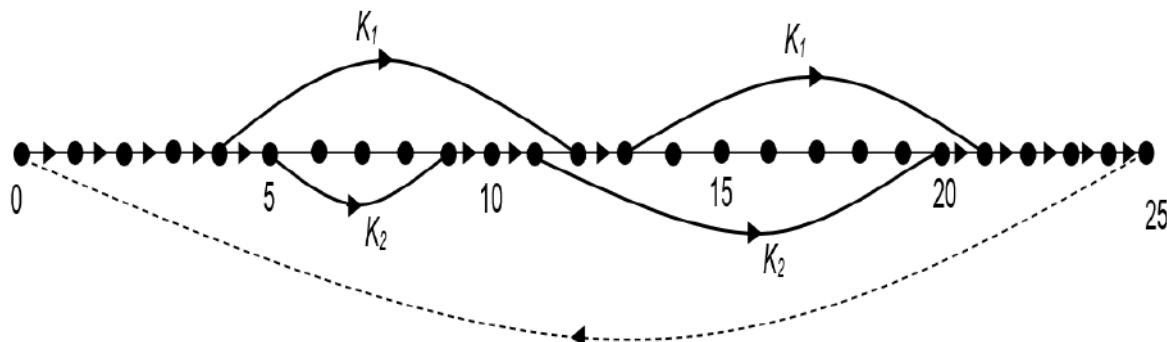


Рис. 3. Оптимальное решение  
Fig. 3. Optimal solution

Таблица 2. Возможные маршруты обслуживания потребителей  
Table 2. Possible consumer servicing routes

Маршрут, $r$	Потребитель, $i$	Начальный интервал, $[T_r^-, T_r^+]$	Дуги, $\{(u, v)^r\}$
$a$	(5)	[5,99; 10,99]	$\{(6, 15)^a; (7, 16)^a; (8, 17)^a; (9, 18)^a; (10, 19)^a; (11, 20)^a\}$
$b$	(4)	[3,44; 5,44]	$\{(4, 12)^b; (5, 13)^b; (6, 14)^b\}$
$c$	(3)	[12,36; 15,36]	$\{(13, 19)^c; (14, 20)^c; (15, 21)^c; (16, 22)^c\}$
$d$	(2)	[10,60; 13,60]	$\{(11, 15)^d; (12, 16)^d; (13, 17)^d; (14, 18)^d\}$
$e$	(2, 3)	[10,20; 12,79]	$\{(11, 19)^e; (12, 20)^e; (13, 21)^e\}$
$f$	(1)	[3,60; 4,60]	$\{(4, 8)^f; (5, 9)^f\}$

Переменные представляют возможные маршруты транспортных средств в модели сетевого потока. Очевидно, что уменьшение количества дуг уменьшает размер модели, повышая ее эффективность.

Подход к решению задачи маршрутизации состоит в перечислении всех возможных маршрутов, и определении соответствующей модели сетевого потока. Выражения (13)–(18) представляют моменты времени. Расстояния в контрольных точках не являются целыми числами, есть альтернативные варианты: либо используется дискретизация, либо применяются процедуры округления для использования цепочисленной единицы времени. Первый вариант привел бы к модели сетевого потока с огромным количеством переменных и ограничений, и не позволил найти оптимальное решение. Найденное решение во втором варианте во многих случаях будет выполнимым. Решение, найденное по модели (13)–(18), недопустимо, возникает необходимость разработки алгоритма, уточняющего итеративно дискретизацию, что позволит достичь оптимального значения

при первоначальной грубой дискретизации времени.

### Заключение

ВМТС – это вариант классической задачи маршрутизации транспортных средств. В статье описана модель сетевого потока и алгоритм решения данной задачи. Проведен вычислительный эксперимент на наборе данных из пяти потребителей и двух транспортных средств. Один из аспектов, который необходимо уточнить, связан с разработкой эффективных схем управления количеством переменных и ограничений модели. Действительно, иногда огромное количество дуг, становится явной проблемой, препятствующей решению задач с большим количеством потребителей. Этого можно будет достичь путем разработки новых гибридных алгоритмов или путем динамического создания дуг. В качестве альтернативы возможна разработка основанной на модели эвристики, использующей преимущества псевдополиномиальной модели [7, 28, 29].

### Список литературы

1. Методы прогнозирования и оптимизации транспортной сети с учетом мощности пассажиро и грузопотоков / В.Е. Гозбенко, А.Н. Иванков, М.Н. Колесник и др. // Деп. рукопись 17.04.2008, № 330-В2008.
2. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Моделирование грузовых перевозок в транспортной сети // Вестн. Ангар. гос. техн. ун-та. 2016. № 10. С. 182–184.
3. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Развитие городских грузовых систем с учетом концепции городского планирования // Сб. науч. тр. Ангар. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 1. № 1. С. 244–247.
4. Полтавская Ю.О. Оптимизация транспортной сети на основе минимума общих затрат на доставку грузов // Вестн. Ангар. гос. техн. ун-та. 2019. № 13. С. 178–183.
5. Казимиров А.О., Михайлов А.Ю., Шаров М.И. Современные особенности размещения логистических центров на примере города Иркутска // Авиамашиностроение и транспорт Сибири : сб. ст. XI Всерос. науч.-техн. конф. Иркутск, 2018. С. 28–32.
6. Казимиров А.О., Михайлов А.Ю. Задачи территориального размещения логистической инфраструктуры в городах // Авиамашиностроение и транспорт Сибири : сб. ст. IX Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2017. С. 351–355.
7. Просов С.Н., Жуков А.В. Эвристические процедуры сменно-суточного планирования развозочных маршрутов // Современные технологии управления в автотранспортных системах : сб. науч. тр. М. : МАДИ, 2007. С. 112–117.
8. Самуилов В.М., Петров А.В., Зубарев А.К. Сравнительный анализ эвристических методов маршрутизации городского транспорта // Транспорт Урала. 2012. № 4 (35). С. 12–16.
9. Fuellerer K.G., Hartl D.R., Iori M. Metaheuristics for vehicle routing problems with three-dimensional loading constraints // European Journal of Operational Research. 2010. № 201 (3). Р. 751–759.
10. Lebedeva O., Kripak M., Gozbenko V. Increasing effectiveness of the transportation network by using the automation of a Voronoi diagram // Transportation Research Procedia. 2018. № 36. Р. 427–433.
11. Christiansen C.H., Lysgaard J. A branch-and-price algorithm for the capacitated vehicle routing problem with stochastic demands // Operations Research Letters. 2007. Vol. 35. № 6. Р. 773–781.
12. Barksou M., Gendreau M. An adaptive evolutionary approach for real-time vehicle routing and dispatching // Computers & Operations Research. 2013. Vol. 40. № 7. Р. 1766–1776.
13. Sarasola B., Doerner K.F., Schmid V., Alba E. Variable neighborhood search for the stochastic and dynamic vehicle routing problem // Annals of Operations Research. 2016. Vol. 236. № 2. Р. 425–461.
14. Azi M.N., Potvin G.J.-Y. An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles // European Journal of Operational Research. 2010. 202. Р. 756–763.
15. Заводченко М.М., Карманов В.С. Эвристические методы решения задачи маршрутизации транспорта с временными окнами // Наука. Технологии. Инновации : тр. конф. В 9 ч. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. С. 247–250.
16. Lijun S., Xiangpei H., Zheng W. Research progress on vehicle path planning problems and solving methods // Systems Engineering. 2006. Vol. 24. Р. 31–36.

17. Чернышев Ю.О., Кубил В.Н. Обзор динамических задач маршрутизации транспорта // Программные продукты и системы. 2020. № 3. С. 491–501.
18. Оленцевич В.А., Гозбенко В.Е. Методическое и программное обеспечение прогнозирования значений уровня безопасности функционирования железнодорожной транспортной системы. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2019. 172 с.
19. Колесник М.Н. Применение динамической транспортной задачи с задержками для согласования ритмов работы поставщиков и перевозчиков // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2009. № 1 (37). С. 63–65.
20. Косенко О.В., Косенко Е.Ю., Номерчук А.Я. Анализ ограничений и вариации задач оптимизации при маршрутизации транспорта // Актуальные проблемы современной науки : материалы Междунар. науч.-практ. конф. В 4 ч. Уфа : Изд-во Башкир. государственный университет. Т 4. С. 163–167.
21. Лебедева О.А., Михайлов А.Ю. Классификация моделей, применяемая к грузовым системам // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 1. С. 248–251.
22. Solving a dynamic routing problem using an optimization algorithm / O.A. Lebedeva, J.O. Poltavskaya, V. Gozbenko et. al. // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies : Journal of Physics: Conference Series. 2020. P. 012101.
23. Solving the vehicle routing problem with time windows and multiple routes exactly using a pseudo-polynomial model / R. Macedo, C. Alves, J.M. Valério de Carvalho et al. // European Journal of Operational Research. 2011. 214(3). P. 536–545.
24. Balagura A.A., Kuzmin O.V. Encoding and decoding algorithms for unlabeled trees // Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 1847(1), P. 012027. DOI:10.1088/1742-6596/1847/1/012027.
25. 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. 19(3). P. 229–242. DOI:10.17654/DM019030229.
26. Poltavskaya J., Lebedeva O., Gozbenko V. Automation of the solution to the problem of optimizing traffic in a multimodal logistics system // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. P. 255–261. DOI:10.1007/978-3-030-57450-5\_23.
27. Гозбенко В.Е., Оленцевич В.А. Повышение безопасности работы железнодорожной транспортной системы на основе автоматизации технологии размещения и крепления груза в вагоне // Известия Трансиба. 2013. № 1 (13). С. 110–116.
28. Захаров В.В., Мугайских А.В. Динамическая адаптация генетического алгоритма маршрутизации транспорта на больших сетях // Управление большими системами. 2018. № 73. С. 108–133.
29. Емельянова Т.С. Эвристические и метаэвристические методы решения динамической транспортной задачи // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. 2007. №3 (31). С. 33–43.

### References

1. Gozbenko V.E., Ivankov A.N., Kolesnik M.N., Pashkova A.S. Metody prognozirovaniya i optimizatsii transportnoi seti s uchetom moschnosti passazhiro i gruzopotokov [Methods of forecasting and optimizing the transport network taking into account the capacity of passenger and cargo flows]. *Deponirovannaya rukopis'* [Deposited manuscript], no 330-V2008 April 17, 2008.
2. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Modelirovaniye gruzovykh perevozok v transportnoi seti [Modeling of freight traffic in the transport network]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Angarsk State Technical University], 2016, no 10, pp. 182-184.
3. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Razvitiye gorodskikh gruzovykh sistem s uchetom kontseptsiy gorodskogo planirovaniya [Development of urban freight systems with regard to the concept of urban planning]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Angarsk State Technical University], 2016, vol. 1, no 1, pp. 244-247.
4. Poltavskaya J.O. Optimizatsiya transportnoi seti na osnove minimum obshchikh zatrat na dostavku gruzov [Optimization of transport network on the basis of minimum total costs for cargo delivery]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Angarsk State Technical University], 2019, no 13, pp. 178-183.
5. Kazimirov A.O., Mikhailov A.Y., Sharov M.I. Sovremennyye osobennosti razmeshcheniya logisticheskikh tsentrov na primere goroda Irkutska [Modern features of the location of logistics centers on the example of the city of Irkutsk]. *Sbornik statei XI Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii «Aviamashinostroyeniye i transport Sibiri»* [Proceedings of the XI All-Russian Scientific and Technical Conference «Aircraft engineering and transport of Siberia»], Irkutsk, 2018. pp. 28-32.
6. Kazimirov A.O., Mikhailov A.Y. Zadachi territorial'nogo razmeshcheniya logisticheskoi infrastruktury v gorodakh [Tasks of the territorial distribution of logistics infrastructure in cities]. *Sbornik statei IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aviamashinostroyeniye i transport Sibiri»* [Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference «Aircraft engineering and transport of Siberia»]. Irkutsk, 2017, pp. 351-355.
7. Prosov S.N., Zhukov A.V. Evristicheskiye protsedury smenno-sutochnogo planirovaniya razvozochnykh marshrutov [Heuristic procedures for shift-daily planning of delivery routes]. *Sbornik nauchnykh trudov «Sovremennyye tekhnologii upravleniya v avtotransportnykh sistemakh»* [Proceedings «Modern control technologies in motor transport systems»]. Moscow, 2007, pp. 112-117.
8. Samuilov V.M., Petrov A.V., Zubarev A.K. Sravnitel'nyi analiz evristicheskikh metodov marshrutizatsii gorodskogo transporta [Comparative analysis of heuristic methods for city transport routing]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2012, no 4 (35), pp. 12-16.
9. Fuellerer K.G., Hartl D.R., Iori M. Metaheuristics for vehicle routing problems with three-dimensional loading constraints // European Journal of Operational Research, 201 (3), 2010, pp. 751–759.
10. Lebedeva O., Kripak M., Gozbenko V. Increasing effectiveness of the transportation network by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*. 2018. pp. 427-433.
11. Christiansen C.H., Lysgaard J. A branch-and-price algorithm for the capacitated vehicle routing problem with stochastic

- demands // Operations Research Letters, 2007, vol. 35, no. 6, pp. 773–781.
12. Barkaoui M., Gendreau M. An adaptive evolutionary approach for real-time vehicle routing and dispatching // Computers & Operations Research, 2013, vol. 40, no. 7, pp. 1766–1776.
  13. Sarasola B., Doerner K.F., Schmid V., Alba E. Variable neighborhood search for the stochastic and dynamic vehicle routing problem // Annals of Operations Research, 2016, vol. 236, no. 2, pp. 425–461.
  14. Azi M.N., Potvin G.J.-Y. An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles // European Journal of Operational Research, 202, 2010, pp. 756–763.
  15. Zavodchenko M.M., Karmanov V.S. Evristicheskiye metody resheniya zadachi marshrutizatsii transporta s vremennymi oknami [Heuristic methods for solving the problem of transport routing with time windows]. *Sbornik nauchnykh trudov «Nauka. Tekhnologii. Innovatsii» (v 9-ti chastyakh)* [Proceedings «Science. Technologies. Innovation. Collection of scientific papers» (In 9 parts)]. Novosibirsk, 2019, pp. 247–250.
  16. Lijun S., Xiangpei H., Zheng W. Research progress on vehicle path planning problems and solving methods // Systems Engineering, vol. 24, 2006, pp. 31–36.
  17. Chernyshev Yu.O., Kubil V.N. Obzor dinamicheskikh zadach marshrutizatsii transporta [A review of dynamic vehicle routing problems]. *Programmnaya produkti i sistemy* [Software & Systems], 2020, vol. 33, no. 3, pp. 491–501.
  18. Olentsevich V.A., Gozbenko V.E. Metodicheskoe i programmnoe obespechenie prognozirovaniya znachenii urovnya bezopasnosti funktsionirovaniya zheleznodorozhnoi transportnoi sistemy [Methodical and software support for predicting the values of the safety level of the functioning of the railway transport system]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2019. 172 p.
  19. Kolesnik M.N. Primeneniye dinamicheskoi transportnoi zadachi s zaderzhkami dlya soglasovaniya ritmov raboty post-avshchikov i perevozchikov [The application of a dynamic transport task with delays to coordinate working rhythms of providers and conveyors]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2009, no 1 (37), pp. 63–65.
  20. Kosenko O.V., Kosenko Ye.Yu., Nomerchuk A.Ya. Analiz ogranicenii i variatsii zadach optimizatsii pri marshrutizatsii transporta [Analysis of limitations and variations of optimization problems in transport routing]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nyye problemy sovremennoy nauki» (V 4-kh chastyakh)* [Proceedings of articles of the International Scientific and Practical Conference (In 4 parts)], Ufa, 2013, vol. 4, pp. 163–167.
  21. Lebedeva O.A., Mikhailov A.Y. Klassifikatsiya modelei, primenayemaya k gruzovym sistemam [Classification model is applied to the cargo system]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Angarsk State Technical University], 2016, Vol. 1, no 1, pp. 248–251.
  22. Lebedeva O.A., Poltavskaya J.O., Gozbenko V., Mikhailov A. Solving a dynamic routing problem using an optimization algorithm // Journal of Physics: Conference Series. «International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies» 2020. p. 012101.
  23. Macedo R., Alves C., Valério de Carvalho J.M., Clautiaux F., Hanaf S. Solving the vehicle routing problem with time windows and multiple routes exactly using a pseudo-polynomial model // European Journal of Operational Research, 214(3), 2011, pp. 536–545.
  24. Balagura A.A., Kuzmin O.V. Encoding and decoding algorithms for unlabeled trees // Journal of Physics: Conference Series, 1847(1), 2021, 012027.
  25. 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, 19(3), 2018, pp. 229–242.
  26. Poltavskaya J., Lebedeva O., Gozbenko V. Automation of the solution to the problem of optimizing traffic in a multimodal logistics system. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. pp. 255–261.
  27. Gozbenko V.E., Olentsevich V.A. Povyshenie bezopasnosti raboty zheleznodorozhnoi transportnoi sistemy na osnove avtomatizatsii tekhnologii razmeshcheniya i krepleniya gruza v vagone [Improving the safety of the railway transport system based on automation of the technology for placing and securing cargo in the car]. *Izvestiya Transsib* [Bulletin of Transsib], 2013, no 1 (13), pp. 110–116..
  28. Zakharov V.V., Mugaiskikh A.V. Dinamicheskaya adaptatsiya geneticheskogo algoritma marshrutizatsii transporta na bol'shikh setyakh [Dynamic adaptation of genetic algorithm for the large-scale routing problems]. *Upravleniye bol'shimi sistemami* [Management of large systems], 2018, no 73, pp. 108–133.
  29. Yemel'yanova T.S. Evristicheskiye i metaevristicheskiye metody resheniya dinamicheskoi transportnoi zadachi [Heuristic and metaheuristic methods for solving a dynamic transport problem]. *Perspektivnyye informatsionnyye tekhnologii i intellektual'nyye sistemy* [Perspective information technologies and intelligent systems], 2007, no 3 (31), pp. 33 – 43.

#### Информация об авторах

**Полтавская Юлия Олеговна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: juliapoltavskaya@mail.ru

#### Information about the authors

**Julia O. Poltavskaya**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department «Management of automobile transport», Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: juliapoltavskaya@mail.ru

## Электромагнитная безопасность на трассах многопутных участков тяговых сетей 25 кВ

Н. В. Буякова<sup>1</sup>, А. В. Крюков<sup>2,3</sup>, Д. А. Середкин<sup>2</sup>, А. Д. Степанов<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Ангарский государственный технический университет, Ангарск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация

<sup>3</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

✉ stepanov\_andrey\_1978@mail.ru

### Резюме

При проектировании и эксплуатации систем тягового электроснабжения особое внимание уделяется вопросам безопасности функционирования объектов транспортной электроэнергетики и снижению их негативных воздействий на персонал и окружающую среду. Один из определяющих факторов таких воздействий заключается в возможности генерации тяговыми сетями электрифицированных железных дорог значительных уровней напряженностей электромагнитных полей. Максимально допустимые уровни напряженностей, определяющие условия электромагнитной безопасности, нормируются и при превышении установленных пределов требуется разработка и внедрение специальных мероприятий. В современных условиях, характеризующихся масштабным использованием средств цифровизации, выбор таких мероприятий должен осуществляться на основе компьютерного моделирования. Поэтому необходима разработка алгоритмов определения электромагнитных полей, которые создаются тяговыми сетями. Для этого могут применяться цифровые модели, в основу которых положены методы определения режимов систем тягового электроснабжения, реализованные в программном комплексе Fazonord. На базе этих моделей реализована методика анализа электромагнитной безопасности, отличающаяся от известных подходов системностью, универсальностью и адекватностью внешней среде. Первое отличие заключается в возможности расчета электромагнитных полей на основе определения режимов сложной системы тягового электроснабжения в фазных координатах; второе – достигается возможностью моделирования тяговой сети различных конструкций: типовых 25 и 2x25 кВ, специализированных, например, оборудованных усиливающими и экранирующими проводами, а также перспективных, с повышенным напряжением в контактной сети. Третье отличие обеспечивается корректным учетом особенностей рельефа, подземных коммуникаций, а также протяженных металлических сооружений, расположенных вблизи моделируемой тяговой сети. В статье описаны компьютерные модели, позволяющие анализировать условия электромагнитной безопасности на трассах многопутных участков железных дорог на основе определения напряженностей электромагнитных полей, которые генерируются тяговыми сетями. Практическое использование этих моделей позволит обоснованно выбирать мероприятия по снижению негативных воздействий электромагнитных полей на персонал, технические средства и окружающую среду.

### Ключевые слова

тяговые сети, многопутные участки, электромагнитные поля, моделирование

### Для цитирования

Буякова Н. В. Электромагнитная безопасность на трассах многопутных участков тяговых сетей 25 кВ / Н. В. Буякова, А. В. Крюков, Д. А. Середкин, Д. А. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 104–113. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).104-113

### Информация о статье

поступила в редакцию: 04.02.2022 г.; поступила после рецензирования: 16.03.2022 г.; принята к публикации: 17.03.2022 г.

### Благодарность

Исследования выполнены в рамках государственного задания по государственной работе «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железнодорожного транспорта, оснащённых устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат», № АААА-А20-120111690029-4 от 16 ноября 2020 г.

## Electromagnetic safety on routes of multiple sections of 25 kV traction networks

Н. В. Buyakova<sup>1</sup>, А. В. Kryukov<sup>2,3</sup>, Д. А. Середкин<sup>2</sup>, А. Д. Степанов<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>3</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ stepanov\_andrey\_1978@mail.ru

## Abstract

When designing and operating traction power supply systems, special attention is paid to the safety of the operation of transport power facilities and the reduction of their negative impacts on personnel and the environment. One of the determining factors of such impacts is the possibility of generating significant levels of electromagnetic fields by traction networks of electrified railways. The maximum allowable stress levels that determine the conditions of electromagnetic safety are standardized, and when the established limits are exceeded, special measures are required to be developed and implemented. In modern conditions, characterized by the large-scale use of digitalization tools, the choice of such activities should be based on computer simulation. Therefore, the development of algorithms for determining electromagnetic fields, produced by traction networks is required. To do this, digital models can be used based on methods for determining the traction power supply system modes, implemented in the Fazonord software package. Based on these models, a methodology for analyzing electromagnetic safety is implemented, which differs from the known approaches by its consistency, universality and adequacy to the external environment. The first difference lies in the possibility of calculating the electromagnetic fields based on the determination of the modes of a complex traction power supply systems in phase coordinates. The second one is achieved by the possibility of modeling traction networks of various designs: typical 25 and 2x25 kV, specialized ones, for example, equipped with reinforcing and shielding wires, as well as advanced ones, with increased voltage in the contact network. The third difference is provided by the correct consideration of the relief features, underground utilities, as well as extended metal structures located near the simulated traction networks. The article describes computer models that make it possible to analyze the conditions of electromagnetic safety on the routes of multi-track sections of railways based on the determination of the strengths of electromagnetic fields generated by traction networks. The practical use of these models will make it possible to reasonably choose measures to reduce the negative effects of electromagnetic fields on personnel, technical facilities and the environment.

## Keywords

traction networks, multi-track sections, electromagnetic fields, modeling

## For citation

Buyakova N. V., Kryukov A. V., Seredkin D. A., Stepanov A. D. Elektromagnitnaya bezopasnost' na trassakh mnogoputnykh uchastkov tyagovykh setei 25 kV [Electromagnetic safety on routes of multiple sections of 25 kV traction networks]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2022, No. 1 (73), pp. 104–113. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).104-113

## Article Info

Received: 04.02.2022; revised: 16.03.2022; accepted: 17.03.2022.

## Acknowledgements

The research was carried out within the framework of the state assignment for state work «Conducting applied scientific research» on the topic «Improving the quality of electrical energy and electromagnetic safety in railway transmission power supply systems equipped with Smart Grid devices by applying methods and means of mathematical modeling based on phase coordinates», project No. AAAAA-A20-120111690029-4 from 16.11.2020.

## Введение

Тяговыми сетями электрифицированных железных дорог (ЭЖД) создаются электромагнитные поля (ЭМП) [1] со значительными уровнями напряженности. Этот фактор может ухудшать условия электромагнитной безопасности (ЭМБ) персонала [2, 3], обслуживающего системы электроснабжения объектов транспорта [4–7]. Электромагнитные поля могут также вызывать нарушение нормальных условий функционирования электронных устройств [8, 9]. Наиболее тяжелые воздействия ЭМП проявляются из-за возникновения наведенных напряжений на линиях электропередачи и связи [10]. В некоторых случаях эти напряжения могут существенно превосходить допустимый уровень и приводить к тяжелым электротравмам [11].

Для повышения ЭМБ обслуживающего персонала требуется разработка и реализация

специальных мероприятий: монтаж экранирующих проводов, использование отсасывающих трансформаторов [3] и др. В условиях масштабного внедрения средств цифровизации выбор таких мероприятий должен базироваться на результатах компьютерного моделирования. Решению задач, связанных с определением напряженностей ЭМП и анализом ЭМБ, посвящено значительное число работ. Так, вопросы обеспечения ЭМБ на железнодорожных объектах рассматриваются в монографии [12]. Результаты исследования ЭМП, воздействующих на персонал, который проводит работы на контактной сети, представлены в статье [13]. Анализ электромагнитной совместимости и ЭМБ в системах тягового электроснабжения приведен в работах [14, 15]. Электромагнитные поля, возникающие на высокоскоростных транспортных системах, рассматриваются в

статье [16]. Методы решения задач анализа и моделирования электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения (СТЭ) предложены в работе [17]. Результаты исследований электромагнитной обстановки на объектах ЭЖД приведены в статьях [18, 19]. Однако вопросы определения напряженностей ЭМП сложных тяговых сетей, обеспечивающих электроснабжение подвижного состава на многопутных участках, остаются недостаточно изученными.

Методы моделирования режимов сложных СТЭ в фазных координатах, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения (ИрГУПС) и реализованные в программном комплексе Fazonord [20], позволяют определять напряженности электромагнитных полей для любой из тяговой сети (ТС), входящей в состав СТЭ [3, 21]. Адекватность расчетов ЭМП подтверждена сравнением результатов моделирования с данными измерений [3]. Одна из отличительных особенностей данной методики состоит в том, что анализируемая тяговая сеть рассматривается как составная часть сложной СТЭ. На этой основе реализуется системный подход, обеспечивающий адекватный анализ ЭМБ на объектах ЭЖД.

Ниже представлены результаты определения и анализа ЭМБ на трассах тяговых сетей многопутных участков.

### Методика моделирования

Методика определения напряженностей ЭМП, реализованная в программном комплексе Fazonord [20], базируется на результатах расчета режима СТЭ на основе алгоритмов, описанных в работах [3, 20]. Ниже представлены основные соотношения, которые применяются в данной методике. При их выводе использовалась декартовая система пространственных координат, оси  $X$  и  $Z$  которой находятся в горизонтальной плоскости, а ось  $Y$  – в вертикальной. Ось  $X$  расположена перпендикулярно трассе ЭЖД, а ось  $Z$  – противоположно направлению тока контактной сети.

Составляющие напряженности электрического поля по осям  $X$ ,  $Y$  определяются по формулам:

$$\dot{E}_y = -\frac{1}{\pi \varepsilon_0} \sum_{i=1}^N \dot{\tau}_i \frac{y_i [(x - x_i)^2 - y^2 + y_i^2]}{\xi_i};$$

$$\dot{E}_x = \frac{2}{\pi \varepsilon_0} \sum_{i=1}^N \dot{\tau}_i \frac{(x - x_i) y y_i}{\xi_i},$$

где  $x$ ,  $y$  – координаты точки пространства, для которой осуществляется расчет;  $N$  – число проводов;  $\dot{\tau}_i$  – удельные заряды токоведущих частей на единицу их длин;

$$\xi_i = [(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2][(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2];$$

Для определения зарядов, составляющих вектор  $\dot{\mathbf{T}} = [\dot{\tau}_1 \dots \dot{\tau}_N]^T$ , используется формула:

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \dot{\mathbf{U}},$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица, компоненты которой рассчитываются так как

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{2y_i}{r_i},$$

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}},$$

здесь  $r_i$  – радиусы круглых проводов или равнозначные радиусы окружностей, эквивалентные периметру поперечного сечения рельсов;  $x_i$ ,  $y_i$  – координаты расположения проводов в вертикальной плоскости;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \text{Ф/м}$ .

Для годографа вектора  $\dot{E}$  могут быть записаны следующие соотношения:

$$E_x(t) = \sqrt{2} E_x \sin(\omega t + \varphi_x);$$

$$E_y(t) = \sqrt{2} E_y \sin(\omega t + \varphi_y),$$

где  $\omega = 2\pi f = 314$  рад/с.

Максимальной величине  $E_{max}$  модуля  $\dot{E}$  отвечает момент времени, который определяется из уравнения:

$$t_{max} = \frac{1}{2\omega} \operatorname{Arctg} \left( \frac{E_x^2 \sin 2\varphi_x + E_y^2 \sin 2\varphi_y}{E_x^2 \cos 2\varphi_x + E_y^2 \cos 2\varphi_y} \right).$$

Необходимое значение арктангенса выбирается из следующего условия:

$$E_x^2 \cos 2(\omega t_{max} + \varphi_x) + E_y^2 \cos 2(\omega t_{max} + \varphi_y) < 0$$

Для эффективного значения напряженности можно записать следующее выражение:

$$E_\psi = \sqrt{E_1 + E_2 + E_3},$$

где  $E_1 = E_x^2 \cos^2 \psi$ ;  $E_2 = E_y^2 \sin^2 \psi$ ;

$$E_3 = 2E_x E_y \sin \psi \cos \psi \cos(\varphi_x - \varphi_y).$$

При этом отсчет угла  $\Psi$  производится от положительного направления оси  $X$ .

Экстремальные величины напряженности рассчитываются так:

$$E_{\psi E} = \sqrt{E_{\psi E 1} \pm E_{\psi E 2}},$$

$$\text{где } E_{\psi E 1} = \frac{(E_x^2 + E_y^2)^2}{2};$$

$$E_{\psi E 2} = \frac{\sqrt{(E_x^2 + E_y^2)^2 - 4E_x^2 E_y^2 \sin^2(\varphi_x - \varphi_y)}}{2},$$

при этом положительный знак отвечает максимуму  $E_{\psi E}$ , а отрицательный – минимуму [3].

Для определения составляющих напряженности магнитного поля, которое генерируется проводами и рельсами, используются выражения

$$\dot{H}_x = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N I_i \frac{y - y_i}{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2};$$

$$\dot{H}_y = -\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N I_i \frac{x - x_i}{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}.$$

Алгоритм определения ЭМП, реализованный в программном комплексе Fazonord [20] включает следующие этапы:

– определение режима СТЭ;

– расчеты токов и зарядов токоведущих частей;

– определение  $\dot{E}_x$ ,  $\dot{E}_y$ ,  $\dot{H}_x$ ,  $\dot{H}_y$ ;

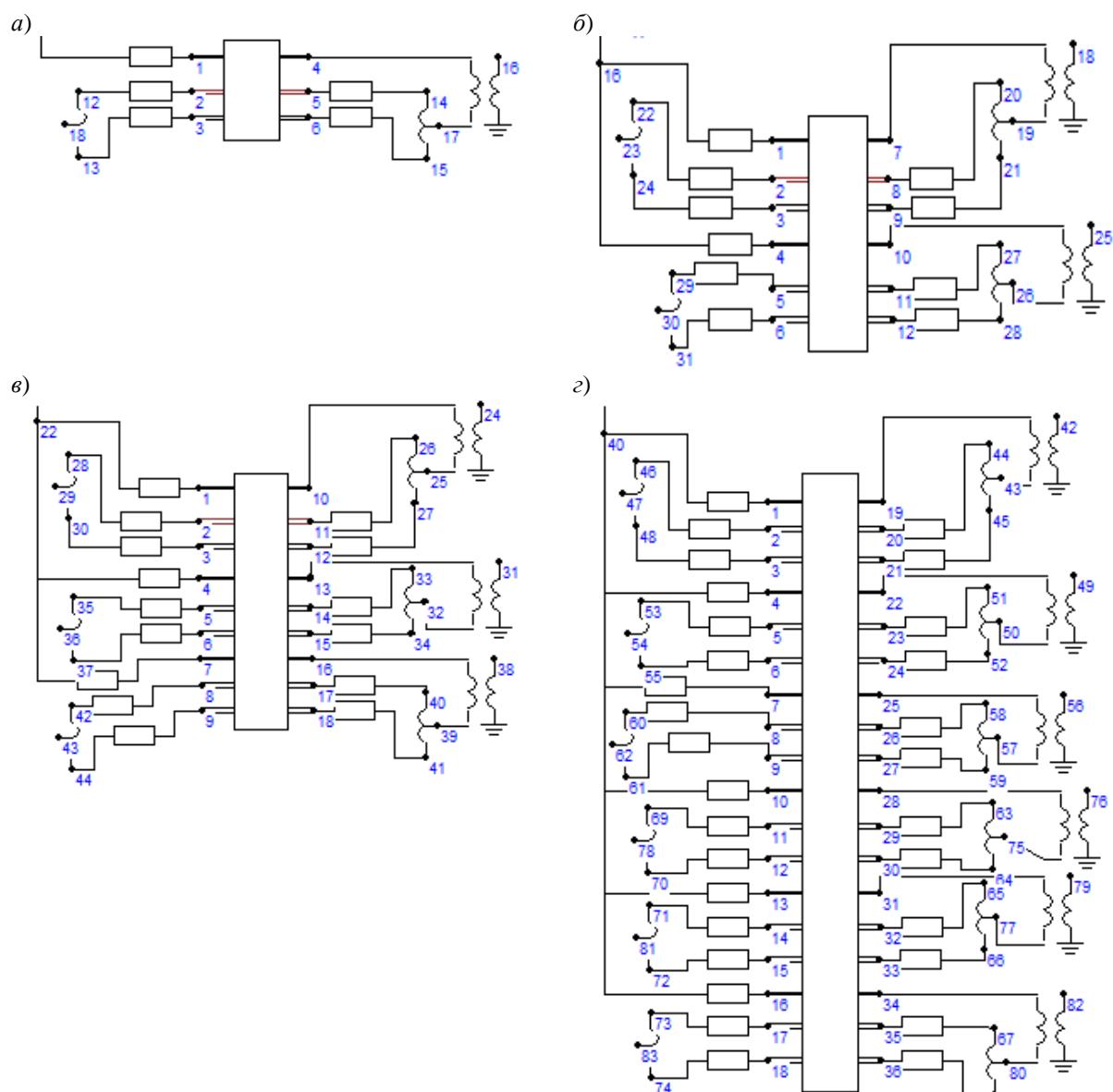


Рис. 1. Фрагменты схемы расчетной модели: *а* – однопутный участок; *б* – двухпутный участок; *в* – трехпутный участок; *г* – шестипутный участок

Fig.1. Fragments of calculated model schemes: *a* – one track section; *b* – two track section; *c* – three track section; *d* – six track section

– расчет экстремальных значений напряженностей и построение годографов.

По полученным результатам рассчитывается плотность потока активной мощности:

$$\Pi_0 = \frac{1}{2}(\Pi_1 + \Pi_2),$$

где

$$\Pi_1 = E_{mx} H_{my} \cos(\psi_{Ex} - \psi_{Hy});$$

$$\Pi_2 = -E_{my} H_{mx} \cos(\psi_{Ey} - \psi_{Hx}).$$

## Результаты моделирования

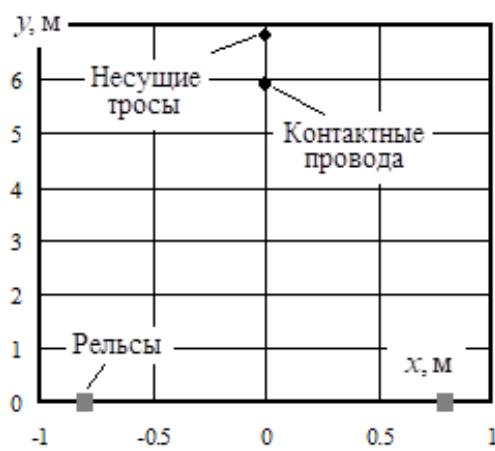
Моделирование проведено для четырех схем тяговых сетей 25 кВ, отличающихся количеством путей. Были рассмотрены следующие участки: однопутный, двухпутный, трехпутный и шестипутный участки (рис. 1).

Для всех схем предусматривалось кон-

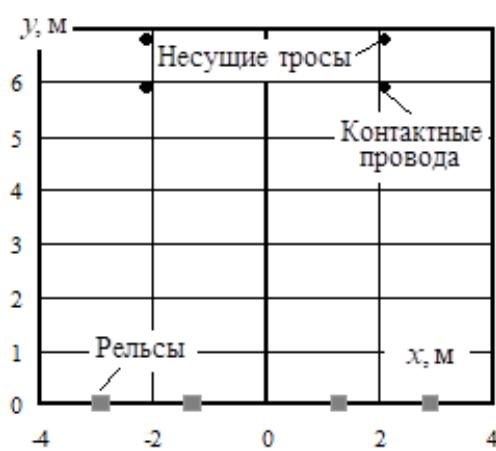
сольное питание тяговой сети. В конце консольей была приложена суммарная нагрузка  $9 + j9$  МВ·А.

Координаты токоведущих частей тяговой сети показаны на рис. 2. Данные о параметрах ее режимов приведены в табл., информация о напряженностях ЭМП представлена на рис. 3. На рис. 3 показаны графики зависимостей  $E_{max} = E_{max}(x)$  и  $H_{max} = H_{max}(x)$ . На рис. 4 представлены аналогичные графики для  $\Pi_0$ . На рис. 5–8 представлены трехмерные диаграммы напряженностей ЭМП. На рис. 9 приведены зависимости максимумов и средних значений амплитуд напряженностей ЭМП от суммарного количества  $N$  токоведущих частей. В число  $N$  были включены контактные провода, несущие тросы и рельсы.

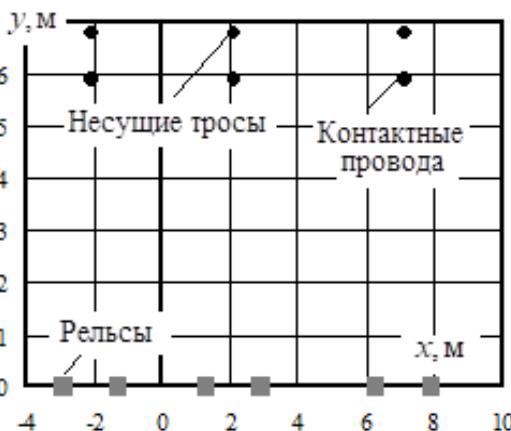
*a)*



*б)*



*в)*



*г)*

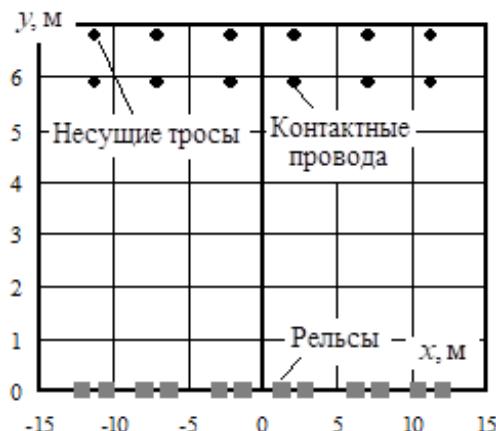


Рис. 2. Сечение тяговой станции: *а* – однопутный участок; *б* – двухпутный участок; *в* – трехпутный участок; *г* – шестипутный участок

Fig. 2. Cross-section of a traction station: *a* – one track section; *b* – two track section; *c* – three track section; *d* – six track section

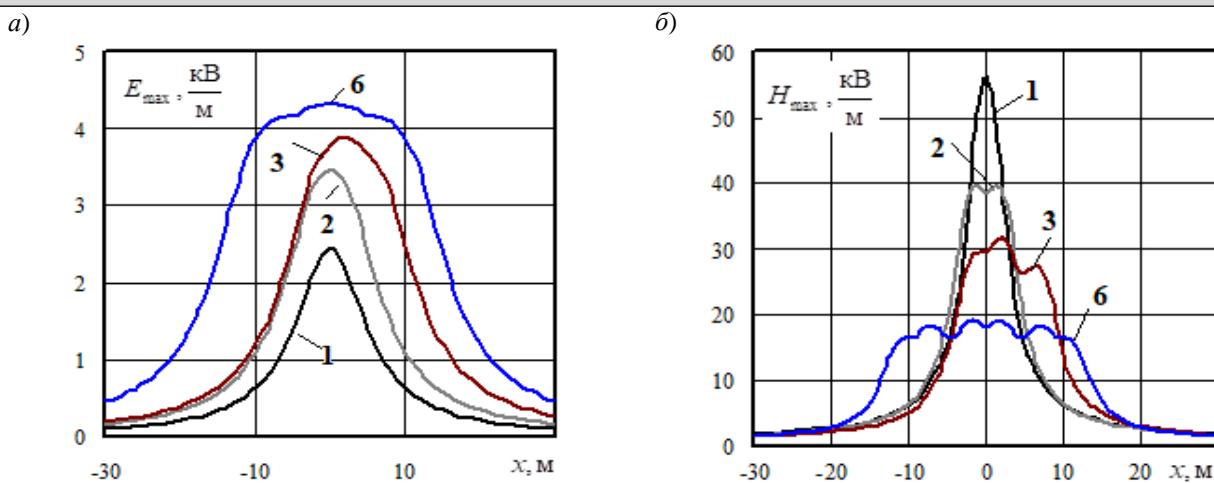


Рис. 3. Амплитуды напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей  
(цифрами обозначено количество путей участка)

Fig. 3. Strength amplitudes of electric field (a) and magnetic field (b)  
(digits denote the number of tracks)

Результаты расчета режимов  
Results of mode calculation

Количество путей	Путь	$U$ , кВ	$U$ , градус	$I$ , А	$I$ , градус
1	1	25,71	-3,34	505,76	-48,56
2	1	25,74	-3,31	249,95	-48,44
	2	25,74	-3,31	250,31	-48,54
3	1	25,75	-3,3	165,93	-48,38
	2	25,75	-3,3	166,02	-48,41
	3	25,75	-3,3	166,07	-48,44
6	1	25,77	-3,29	82,25	-48,09
	2	25,77	-3,29	82,27	-48,11
	3	25,77	-3,29	82,28	-48,11
	4	25,77	-3,29	82,3	-48,14
	5	25,77	-3,29	82,62	-48,35
	6	25,77	-3,29	82,58	-48,33

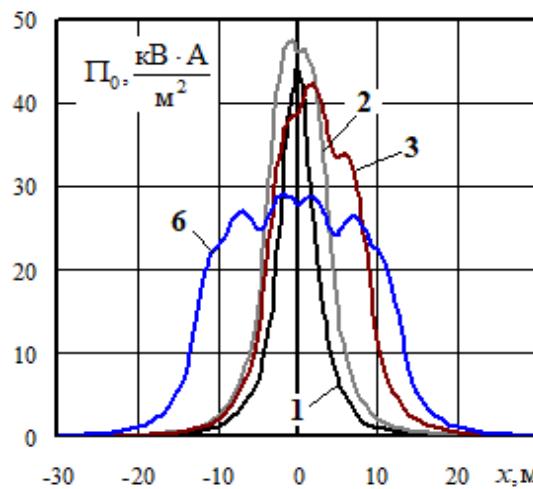
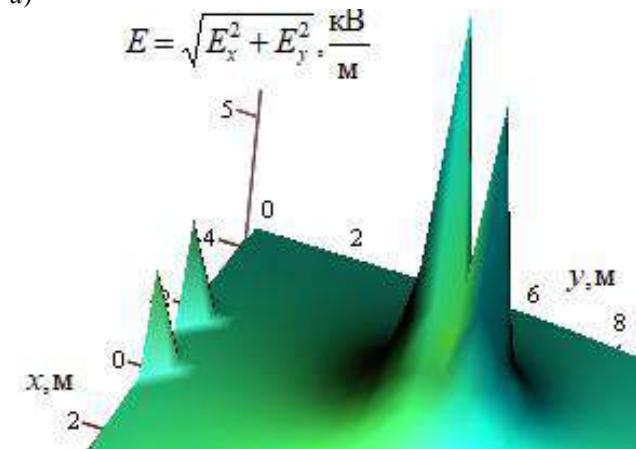


Рис. 4. Плотность потока активной электромагнитной энергии  
(цифрами обозначено количество путей участка)

Fig. 4. Density of an active electromagnetic energy flow  
(digits denote the number of tracks)

a)



б)

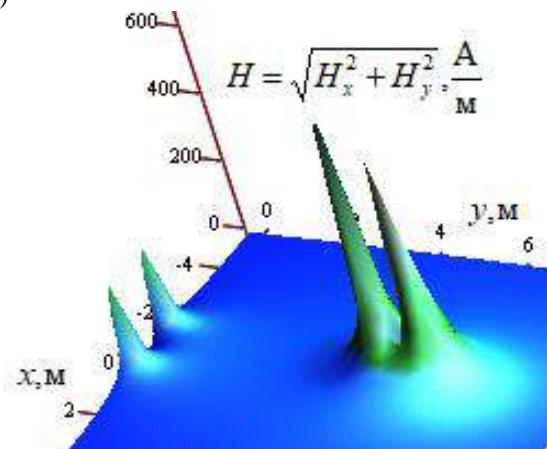
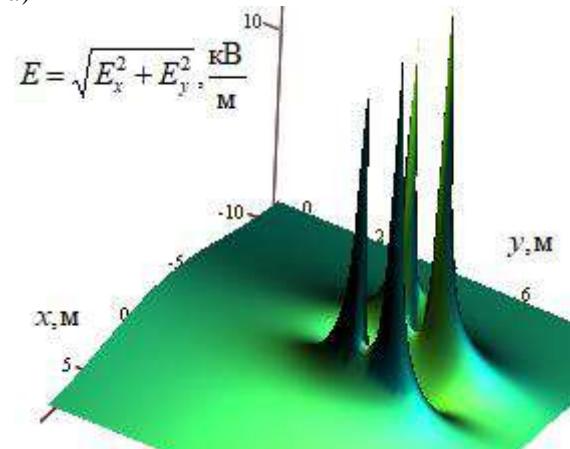


Рис. 5. Трехмерные диаграммы электрического (a) и магнитного (б) полей для однопутного участка  
Fig. 5. Three dimension diagrams of electric (a) and magnetic (b) fields for a one track section

a)



б)

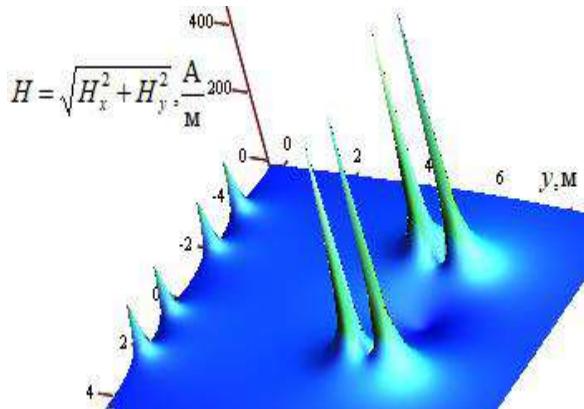
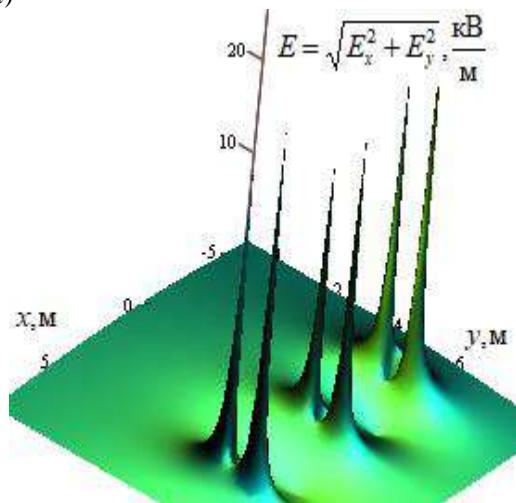


Рис. 6. Трехмерные диаграммы электрического (a) и магнитного (б) полей для двухпутного участка  
Fig. 6. Three dimension diagrams of electric (a) and magnetic (b) fields for a two track section

a)



б)

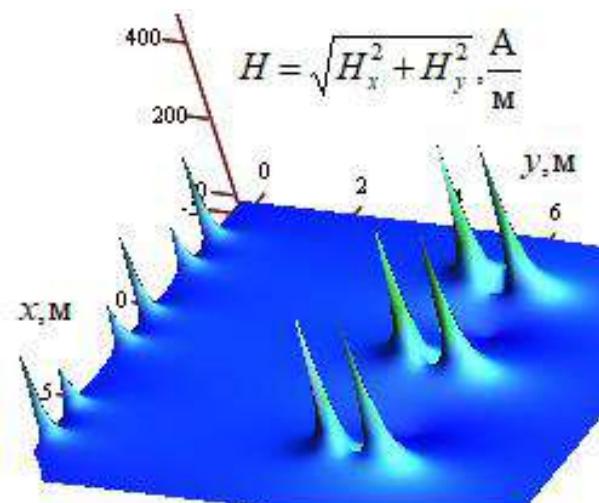


Рис. 7. Трехмерные диаграммы электрического (a) и магнитного (б) полей для трехпутного участка  
Fig. 7. Three dimension diagrams of electric (a) and magnetic (b) fields for a three track section

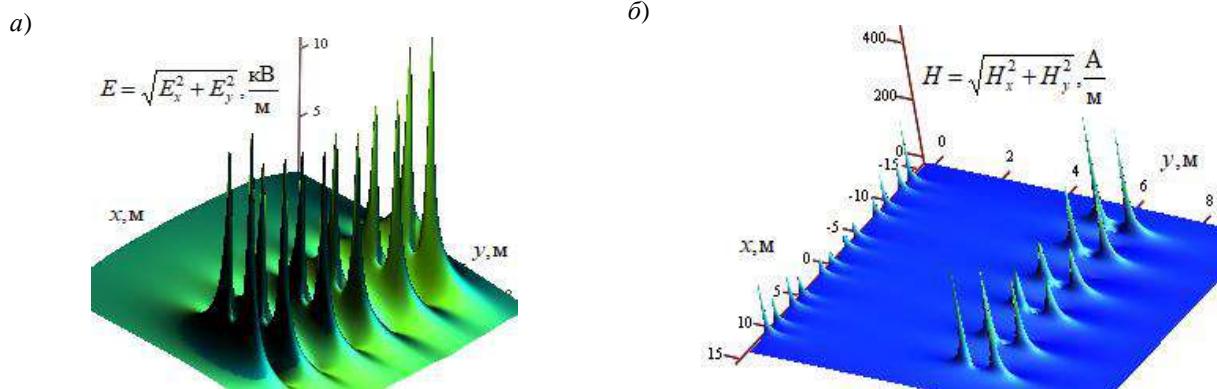


Рис. 14. Трехмерные диаграммы электрического (а) и магнитного (б) полей для шестипутного участка  
Fig. 14. Three dimension diagrams of electric (a) and magnetic (b) fields for a six track section

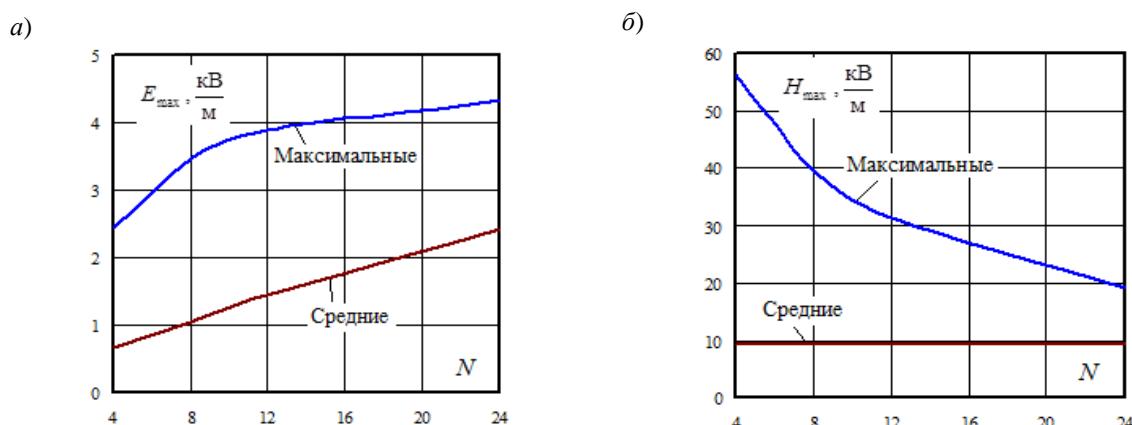


Рис. 9. Максимумы и средние значения амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей (через  $N$  обозначено суммарное количество токоведущих частей) для рис. 2  
Fig. 9. Maximum and average values of strength amplitudes of electric field (a) and magnetic field (b)

( $N$  designates total number of conducting live parts for fig. 2)

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 3–9 и в табл., дает возможность сформулировать следующие выводы:

1. С ростом количества токоведущих частей максимальные и средние значения амплитуд  $E_{\max}$  увеличиваются, их величины не превышают допустимого действующего значения в 5 кВ/м. Зависимость  $\max(E_{\max})$  от  $N$  имеет выраженный нелинейный характер, а аналогичный график для средних значений является практически линейным.

2. Наибольшей плотностью потока электромагнитной энергии отличается двухпутный участок, наименьшей величине  $P_0$  отвечает шестипутный;

3. Трехмерные диаграммы показывают, что наибольший уровень напряженностей ЭМП имеют места вблизи проводов контактных подвесок. Это следует учитывать при организации работ на контактной сети без снятия напряжения;

4. Максимумы амплитуд напряженностей магнитного поля уменьшаются с ростом числа  $N$ , а средние значения от этого параметра практически не зависят. При принятых величинах нагрузки уровни напряженностей магнитного поля не превышают допустимого действующего значения 80 А/м. Зависимость  $\max(H_{\max})$  от  $N$  имеет нелинейный характер.

### Заключение

Представленная методика расчетов напряженностей ЭМП тяговых сетей 25 кВ базируется на определении режима системы тягового и внешнего электроснабжения с использованием фазных координат. В условиях цифровизации транспортной электроэнергетики применение этой методики на практике позволит обоснованно подходить к анализу условий электромагнитной безопасности и разрабатывать мероприятия по ее улучшению.

**Список литературы**

1. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М. : Интекст, 2008. 480 с.
2. Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов. М. : Наука, 2010. 868 с.
3. Буякова Н.В., Закарюкин В. П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление. Ангарск : АнГТУ, 2018. 382 с.
4. Frey Sh. Railway Electrification Systems & Engineering. Delhi : White Word Publications, 2012. 145 p.
5. Energieversorgung elektrischer bannen / H. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. Wiesbaden : B.G. Teubner Verlag, 2006, 732 p.
6. Блейк Левитт Б. Защита от электромагнитных полей. О влиянии на организм человека бытовых электроприборов, мобильных телефонов, линий электропередач и других электрических устройств. М. : АСТ, Астрель, 2007. 447 с.
7. Корсунов А.Р. Разработка метода измерения напряженности электромагнитного поля в пространстве телекоммуникационных средств комплекса электромагнитного воздействия на биоструктуры // Вестн. Национальной техн. ун-та. Сер. Информатика и моделирование. 2007. № 19. С. 111–114.
8. Н. В., Соловьева Е. Б., Нитч Ю. Низкочастотные помехи в нелинейных электронных устройствах при воздействии внешнего электромагнитного поля // Электричество. 2005. № 8. С. 34–40.
9. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех в электронных средствах при воздействии электромагнитных полей высоковольтных линий электропередачи // Электротехника. 2018. № 5. С. 45–48.
10. Залесова О.В. Исследование уровня наведенного напряжения на отключенной линии электропередачи, находящейся в зоне влияния тяговой сети железной дороги переменного тока // Вестн. Мурман. гос. техн. ун-та. 2014. Т. 17. № 1. С. 40–45.
11. Мисриханов М.Ш., Мирзаабдулаев А.О. Анализ причин несчастных случаев и мер защиты от наведенного напряжения на воздушных линиях электропередачи // Электрические станции. 2008. № 11. С. 44–49.
12. Аполлонский С.М. Проблемы электромагнитной безопасности на электрифицированной железной дороге. Т. II. Электромагнитная безопасность на железной дороге с переменным током в тяговой сети. М. : Руслайнс, 2017. 414 с.
13. Закирова А.Р., Буканов Ж.М. Исследование электромагнитных полей на рабочих местах персонала, обслуживающего контактную сеть // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщения. 2016. № 2 (30). С. 73–83.
14. Ogunsola A. and Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railways. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag 2013. 568 pp.
15. EMC in Rail Transportation / L. Xiaotian, Z. Haijing, Q. Bo et al. // CUE2016-Applied Energy Symposium and Forum 2016: Low carbon cities & urban energy systems. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216316472> (access date: 02.02.2022).
16. Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems / R. Kircher, J. Klühspies, R. Palka, et al. // Transportation Systems and Technology. 2018. Vol. 4(2). P. 152–166.
17. EMC Analysis of Railway Power Substation Modeling and Measurements Aspects / S. Baranowski, H. Ouaddi, L. Kone et al. // Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway. InTech. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/34794>. (access date: 10.02.2022).
18. Oancea C. D., Calin F., Golea V. On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations // International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN). Publisher: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/SIELMEN.2019.8905871.
19. Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network / L. Zhang, Y. Zhu, S. Chen, et al. // XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). Publisher: IEEE, 2021. DOI: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.
20. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложннесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2005. 273 с.
21. Simulation of Electromagnetic Fields Generated by Overhead Power Lines and Railroad Traction Networks / N.V. Buyakova, V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov et al. // Energy Systems Research. 2021. Vol. 4, №. 2. P. 70–88.

**References**

1. Kosarev A.B., Kosarev B.I. Osnovy elektromagnitnoi bezopasnosti sistem elektronsnabzheniya zheleznodorozhnoi transporta [Fundamentals of electromagnetic safety of railway transport power supply systems]. Moscow: Intekst Publ., 2008. 480 p.
2. Misrikhanov M.Sh., Rubtsova N.B., Tokarsky A.Yu. Obespechenie elektromagnitnoi bezopasnosti elektrosetevykh ob'ektov [Ensuring the electromagnetic safety of electric grid facilities]. Moscow: Nauka Publ., 2010. 868 p.
3. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh elektronsnabzheniya zheleznnykh dorog: modelirovaniye i upravlenie [Electromagnetic safety in railroad power supply systems: modeling and control]. Angarsk: AnGTU Publ., 2018. 382 p.
4. Sheilah Frey Railway Electrification Systems & Engineering. White Word Publications, Delhi 2012. 145 p.
5. Energieversorgung elektrischer bannen / H. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. Wiesbaden : B.G. Teubner Verlag, 2006, 732 p.
6. Blake Levitt B. Zashchita ot elektromagnitnykh polei. O vliyanii na organizm cheloveka bytovyykh elektroprriborov, mobil'nykh telefonov, linii elektroperedach i drugikh elektricheskikh ustroistv [Protection from electromagnetic fields. On the impact on the human body of household electrical appliances, mobile phones, power lines and other electrical devices]. Moscow: AST, Astrel Publ., 2007. 447 p.
7. Korsunov A.R. Razrabotka metoda izmereniya napryazhennosti elektromagnitnogo polya v prostranstve telekommunikacionnykh sistem [Development of a method for measuring the intensity of an electromagnetic field in the space of communication systems]. Irkutsk: Irkutsk State University, 2012. 145 p.

nikatsionnykh sredstv kompleksa elektromagnitnogo vozdeystviya na biostruktury [Development of a method for measuring the intensity of an electromagnetic field in the space of telecommunication means of a complex of electromagnetic effects on biostructures]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta (Khar'kovskii politekhnicheskii institut). Seriya: Informatika i modelirovaniye* [Bulletin of the National Technical University (Kharkov Polytechnic Institute). Series: Informatics and modeling]. 2007, no 19, pp. 111-114.

8. Korovkin N.V., Solovieva E.B., Nitch Yu. Nizkochastotnye pomekhi v nelineinykh elektronnykh ustroistvakh pri vozdeistvii vneshnego elektromagnitnogo polya [Low-frequency interference in nonlinear electronic devices under the influence of an external electromagnetic field]. *Elektricheskvo* [Electricity]. 2005, no 8, pp. 34-40.

9. Gizatullin Z.M., Nuriev M.G., Gizatullin R.M. Fizicheskoe modelirovaniye elektromagnitnykh pomekhh v elektronnykh sredstvakh pri vozdeistvii elektromagnitnykh polei vysokovol'tnykh linii elektroperedachi [Physical modeling of electromagnetic interference in electronic means under the influence of electromagnetic fields of high-voltage power lines]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2018, no 5, pp. 45-48.

10. Zalesova O.V. Issledovanie urovnya navedennogo napryazheniya na oklyuchennoi linii elektroperedachi, nakhodyashcheysha v zone vliyaniya tyagovoii seti zheleznoi dorogi peremennogo toka [Study of the level of induced voltage on a disconnected power line located in the zone of influence of the traction network of an alternating current railway]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Murmansk State Technical University]. 2014, vol. 17, no 1, pp. 40-45.

11. Misrikhanov M.Sh., Mirzaabdulaev A.O. Analiz prichin neshchastnykh sluchaei v mer zashchity ot navedennogo napryazheniya na vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi [Analysis of the causes of accidents and protection measures against induced voltage on overhead power lines]. *Elektricheskie stantsii* [Electric Stations]. 2008, no 11, pp. 44-49.

12. Apollonskii S.M. Problemy elektromagnitnoi bezopasnosti na elektrifitsirovannoi zheleznoi doroge. T. II. Elektromagnitnaya bezopasnost' na zheleznoi doroge s peremennym tokom v tyagovoii seti [Problems of electromagnetic safety on the electrified railway. Vol. II. Electromagnetic safety on the railway with alternating current in the traction network]. Moscow: Ruscience Publ., 2017. 414 p.

13. Zakirova A.R., Bukanov Zh.M. Issledovaniya elektromagnitnykh polei na rabochikh mestakh personala, obsluzhivayushchego kontaktuyu set' [Research of electromagnetic fields at the workplaces of personnel serving the contact network]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University]. 2016, no 2 (30), pp. 73-83.

14. Ogunsola A. and Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railways. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, 568 p.

15. Luan Xiaotian, Zhu Haijing, Qiu Bo, Han Bochong. EMC in Rail Transportation. CUE2016-Applied Energy Symposium and Forum 2016: Low carbon cities & urban energy systems. Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

16. Kircher R., Klühspies J., Palka R., et al. Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems. Transportation Systems and Technology. 2018; 4(2):152-166.

17. Baranowski S., Ouaddi H., Kone L. and Idir N. EMC Analysis of Railway Power Substation Modeling and Measurements Aspects. Infrastructure Design, Signaling and Security in Railway. InTech Available from [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com).

18. Constantin Daniel Oancea, Florin Calin, Valentin Golea. On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations. 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN). 2019 Publisher: IEEE.

19. Lu Zhang, Yun Zhu, Song Chen, Dan Zhang. Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network. 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). 2021 Publisher: IEEE.

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

21. Natalya V. Buyakova, Vasiliy P. Zakaryukin, Andrey V. Kryukov, Dmitriy A. Seredkin. Simulation of Electromagnetic Fields Generated by Overhead Power Lines and Railroad Traction Networks. Energy Systems Research, Vol. 4, no. 2, 2021. P. 70-88.

### Информация об авторах

**Буякова Наталья Васильевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: bn\_900@mail.ru

**Крюков Андрей Васильевич**, д-р. техн. наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения; Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

**Середкин Дмитрий Александрович**, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: dmitriy987@mail.ru

**Степанов Андрей Дмитриевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: stepanov\_andrey\_1978@mail.ru

### Information about the authors

**Natalia V. Buyakova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Department «Power supply of industrial enterprises», Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: bn\_900@mail.ru

**Andrey V. Kryukov**, Doctor of Engineering Science, Professor, the Full Professor of Department «Electric power industry of transport», Irkutsk State Transport University; Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

**Dmitrii A. Seredkin**, Ph. D. student of Department «Electric power industry of transport», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: dmitriy987@mail.ru

**Andrei D. Stepanov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Department «Electric power industry of transport», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: stepanov\_andrey\_1978@mail.ru

## Совершенствование системы контроля параметров в процессе сушки изоляции обмоток тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6

А. Н. Калякулин, М. В. Анахова, А. С. Тычков✉

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, Российская Федерация

✉ al2000@rambler.ru

### Резюме

В статье рассмотрен процесс сушки обмоток тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС6 с помощью калориферной установки. Анализ процесса сушки позволил выявить следующие недостатки: высокий риск влияния человеческого фактора как на сам процесс сушки, так и на измерение параметров; перегрев верхних слоев изоляции из-за несвоевременного отключения калориферов и, как следствие, образование микротрещин в верхних слоях изоляции; низкая энергическая эффективность, а, значит, и увеличение расходов на электроэнергию. Для повышения эффективности сушки предлагается автоматизировать процесс работы калориферной установки при помощи внедрения схемы на базе современных силовых полупроводниковых приборов. Для текущего контроля параметров изоляции тяговых электродвигателей во время сушки предлагается использовать штатные мегаомметры МГМ-1 электровоза 2ЭС6, что позволит вести регистрацию и анализ исследуемых величин. Предлагаемая в данной статье система автоматического контроля состояния изоляции в процессе сушки на калориферной установке позволит: автоматизировать измерение сопротивления изоляции, что будет способствовать в режиме реального времени объективно оценить физическое состояние обмоток и принять своевременное решение о необходимости корректировки, продолжения или прекращения сушки; сократить продолжительность процесса сушки изоляции на калориферной установке; фиксировать оперативную информацию по параметрам изоляции тяговых электродвигателей в процессе сушки для его анализа и оптимизации.

### Ключевые слова

тяговый электродвигатель, изоляция изоляция обмоток, калориферная установка, сопротивление изоляции, коэффициент абсорбции

### Для цитирования

Калякулин А. Н. Совершенствование системы контроля параметров в процессе сушки изоляции обмоток тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 / А. Н. Калякулин, М. В. Анахова А. С. Тычков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 114–122. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).114-122

### Информация о статье

поступила в редакцию: 21.03.2022 г.; поступила после рецензирования: 24.03.2022 г.; принята к публикации: 25.03.2022 г.

## Improvement of the parameter control system in the process of drying the insulation of the windings of traction electric motors of electric locomotives 2ES6

А. Н. Калякулин, М. В. Анахова, А. С. Тычков✉

Samara State Transport University, Samara, the Russian Federation

✉ al2000@rambler.ru

### Abstract

The article deals with the process of drying the windings of traction electric motors of the electric locomotive 2ES6 using a calorifier installation. Analysis of the drying process revealed the following shortcomings: a high risk of the influence of the human factor, both on the drying process and on the process of measuring parameters; overheating of the upper layers of insulation due to untimely shutdown of the radiators and, as a result, the formation of microcracks in the upper layers of the insulation; low energy efficiency, which means increased energy costs. To increase the efficiency of drying, it is proposed to automate the process of operation of the calorifier unit by introducing a circuit based on modern power semiconductor devices. For the current control of the traction electric motors insulation parameters during drying, it is proposed to use the standard MGM-1 megohmmeters of the 2ES6 electric locomotive, which will allow recording and analyzing the studied values. The system of automatic control of the insulation condition proposed in this article during the drying process on the heater installation will allow: to automate the measurement of insulation resistance, which will allow in real time to objectively assess the physical condition of the windings and make a timely decision on the need to adjust, continue or stop drying; to shorten the duration of the insulation drying process on the heater installation; to fix the operational information on the insulation parameters of traction motors during the drying process for subsequent analysis and optimization of the process.

**Keywords**

traction motor, insulation, humidification, drying, parameters, insulation resistance, absorption coefficient

**For citation**

Kalyakulin A. N., Anakhova M. V., Tychkov A. S. Sovershenstvovanie sistemy kontrolya parametrov v protsesse sushki izolyatsii obmotok tyagovykh elektrodvigatelei elektrovozov 2ES6 [Improvement of the parameter control system in the process of drying the insulation of the windings of traction electric motors of electric locomotives 2ES6]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 114–122. — DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).114-122

**Article Info**

Received: 21.03.2022; revised: 24.03.2022; accepted: 25.03.2022.

**Введение**

Изоляция обмоток тяговых электродвигателей (ТЭД) испытывает последствия различных видов воздействий: механических, электрических, тепловых. Увлажнение изоляции – фактор, отягчающий влияние указанных нагрузок, особенно характерный для зимних периодов эксплуатации с повышенным уровнем осадков и приводящий к снижению электрических свойств и уменьшению уровня диэлектрической прочности [1, 2].

Применение аппаратов защиты, средств технического диагностирования и контроля параметров состояния элементов ТЭД локомотивов помогают выявить последствия снижения диэлектрических свойств изоляции в виде неисправностей различных элементов ТЭД, но не позволяют восстановить и повысить качество самой изоляции [3, 4].

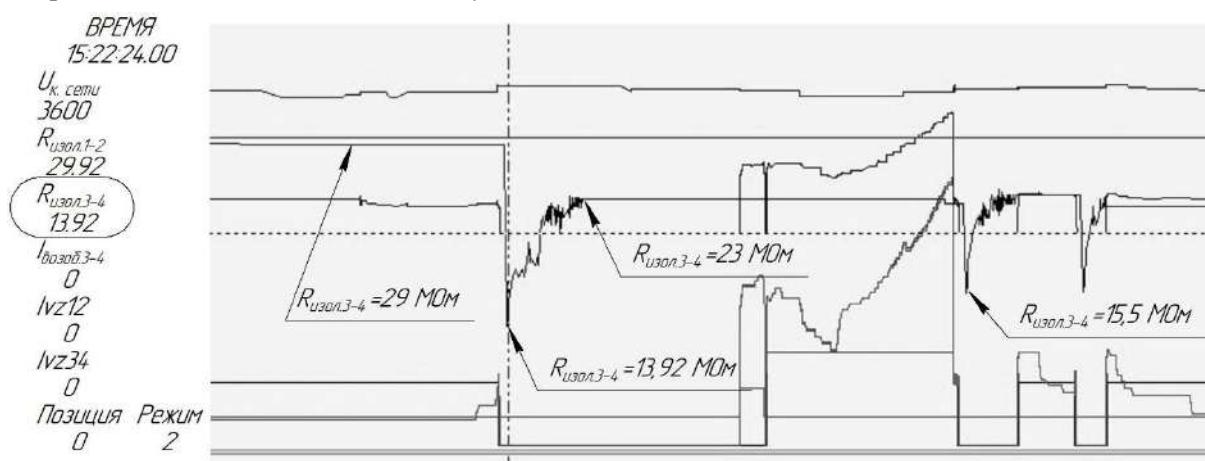
Проблема увлажнения изоляции актуальна для электровозов серии 2ЭС6 ввиду наличия конструктивных недостатков защиты ТЭД от попадания атмосферных осадков. На переувлажнение изоляции влияет время нахождения электровоза в отстой [5]. Последствия увлажне-

ния обмоток – это «плавающее» значение сопротивления изоляции ТЭД. На рис. 1 представлен график «плавающей» изоляции: снижение сопротивления изоляции тяговых двигателей № 3-4 с 30 МОм до 13,92 МОм, дальнейшее восстановление сопротивления до 23 МОм и снижение до 15,5 МОм. График получен путем выгрузки из файла регистратора параметров микропроцессорной системы управления и диагностики (РПМ) электровоза 2ЭС6 № 889.

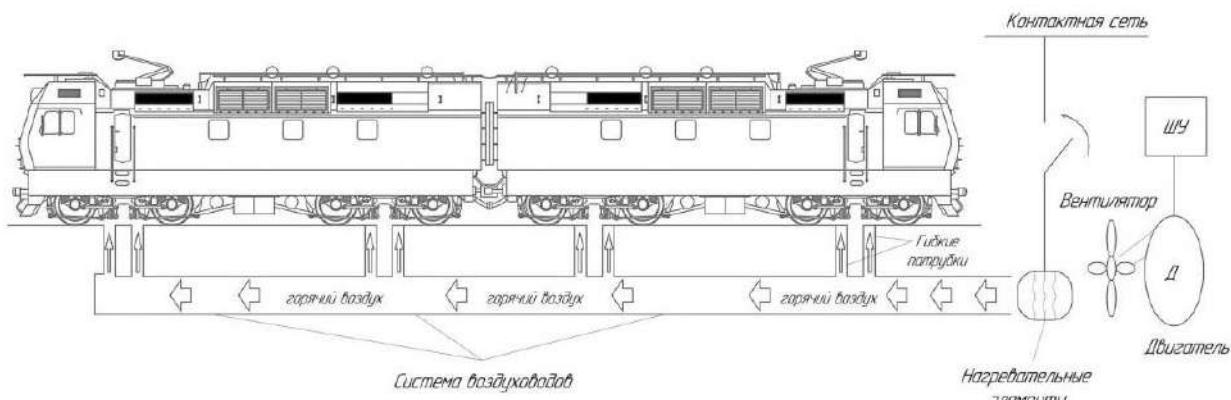
При таком значении сопротивления невозможно реализовать максимальную силу тяги, так как система управления электровозом отключает двигатели с низким сопротивлением изоляции. В самых тяжелых случаях тяговый двигатель может выйти из строя, о чем свидетельствуют распределение причин неплановых ремонтов ТЭД электровозов 2ЭС6 за 2020 г. [6, 7].

**Анализ существующего технологического процесса сушки изоляции тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6**

Основной существующий технологический процесс сушки ТЭД определен нормативными документами ОАО «РЖД» [8], а также



**Рис. 1.** Выгрузка из файла регистратора параметров микропроцессора электровоза 2ЭС6 № 889  
**Fig.1.** Unloading from the microprocessor parameter logger file of electric locomotive 2ES6 no 889



**Рис. 2.** Схема работы калориферной установки  
**Fig. 2.** The scheme of operation of the heater installation

Руководством по эксплуатации электровоза 2ЭС6 [9]. Для сушки изоляции обмоток тяговых двигателей можно применять горячий воздух от стационарных калориферных установок, постоянный электрический ток низкого напряжения от специального источника и комбинированный способ – одновременно горячим воздухом и током низкого напряжения. Каждый способ имеет свои преимущества и недостатки [10, 11]. Широко распространен первый способ – сушка от стационарного калорифера на ремонтной позиции, схема которого приведена на рис. 2.

Постоянный электрический ток напряжением 3 кВ (от контактной сети), проходя по нагревательным элементам, выделяет тепло. В качестве нагревательных элементов используется тугоплавкий металл, как правило, это пусковые сопротивления, демонтированные с электровозов. Подключение нагревательных элементов к контактной сети производится вручную при помощи рубильника. Сотрудники, выполняющие данную операцию, должны быть специально обучены и относиться к категории оперативно-ремонтного персонала. Перед каждым включением рубильника должен оформляться наряд-допуск на выполнение работ повышенной опасности. Горячий воздух с поверхности нагревательных элементов поступает в систему воздуховодов при помощи вентилятора, приводом которого является электродвигатель переменного тока (380 В), запуск электродвигателя осуществляется при помощи нажатия кнопки шкафа управления. Затем горячий воздух подается через гибкие патрубки воздуховодов к нижним смотровым люкам тягового двигателя.

Недостатки существующего технологического процесса сушки изоляции ТЭД следующие:

1. Процесс происходит при участии ремонтного персонала, тем самым высоки риски влияния человеческого фактора как на сам процесс сушки, так и на измерение параметров.

2. Перегрев верхних слоев изоляции из-за неотключения калориферов и образование микротрещин в верхних слоях изоляции, при этом ТЭД повреждаются до такого уровня, что для восстановления требуется капитальный ремонт. Практика показывает, что включение вентилятора без калорифера чаще не выполняется, что обусловлено отвлечением оперативно-ремонтного персонала на другие срочные деповские работы.

3. Низкая энергическая эффективность установки и, значит, повышенные расходы на электроэнергию и увеличение времени простоя на сушке.

С целью исключения указанных недостатков предлагается автоматизировать как управление калориферными установками, так и измерение контролируемых параметров таким образом, чтобы оба этих процесса проходили при минимальном участии человека.

Разработка новых способов сушки изоляции электромашин и конструкциям установок для сушки посвящено большое количество научных работ [12–18]. В данном исследовании предлагается усовершенствовать процесс сушки изоляции ТЭД с использованием калориферных установок, которые в настоящее время используются в сервисных локомотивных депо ООО «СТМ-Сервис».

## Автоматизация существующего технологического процесса сушки изоляции тягового электродвигателя электровозов 2ЭС6

Процесс сушки изоляции ТЭД согласно [8] имеет несколько периодов:

1. Включение вентилятора без нагрева  $t = 20$  мин.
2. Включение вентилятора и калорифера  $t = 60$  мин.
3. Замер сопротивления по истечении 60 минут сушки.
4. Включение вентилятора без нагрева  $t = 30$  мин.
5. Пункты 2-4 повторяются до принятия сопротивлением изоляции постоянной величины.

Так как влага находится, в основном, в поверхностных слоях изоляции обмотки, то в период интенсивного нагрева большая ее часть удаляется в первых циклах процесса сушки. Чередование периодов интенсивного нагрева изоляции с хорошей вентиляцией позволяет использовать эффект внутреннего термовлагопереноса и завершить процесс с повышением уровня энергетической мощности в каждом цикле сушки с минимальными затратами энергии и на сравнительно низком температурном режиме, что, в свою очередь, не только значительно сокращает расход энергии, но и обеспечивает более высокий уровень диэлектрических свойств изоляции после сушки, а также уменьшает показатели ее старения. Циклическое подключение нагревательных элементов к контактной сети (3 кВ) может быть реализовано с помощью одного или нескольких тиристоров, включенных последовательно. Если тиристоры включены последовательно, то, по закону Кирхгофа, обратное напряжение, приложенное к тиристору, поделится на количество тиристоров, включенных в цепь. У каждого тири-

стора своя вольтамперная характеристика, следовательно, при протекании через них одного и того же обратного тока, напряжения на тиристорах будут различными. В более тяжелом состоянии оказывается тиристор с меньшим временем восстановления запирающих свойств, к нему будет прикладываться суммарное напряжение всей системы (3 000 В), что приведет к самопроизвольному открытию тиристора или пробою его структуры, поэтому перед включением тиристоров в последовательную цепь проводят их подбор по восстанавливающим и запирающим свойствам специальным устройством или указанная проверка выполняется заводом-изготовителем по предварительному согласованию. Оба варианта в условиях сервисного локомотивного депо выполнить затруднительно.

Вместо цепочки последовательно соединенных тиристоров предлагается использовать более мощный тиристор модели Т283-2500, повторяющееся импульсное обратное напряжение которого в зависимости от класса прибора может составлять 3 000–3 400 В. Стоимость одного такого тиристора больше стоимости комплекта тиристоров, рассчитанных на меньшее напряжение, однако его использование экономически выгодно, так как отпадает необходимость разработки и приобретения специальной электрической схемы для защиты последовательно соединенных тиристоров от неравномерного распределения напряжения.

Для отвода тепла от тиристора следует применить охладитель модели О473, управлять моментами включения и выключения тиристора Т283-2500 следует при помощи драйвера ДРТ11-5-6ФП1К-1, причем все комплектующие производятся ПАО «Электровыпрямитель». С учетом предлагаемых изменений установка будет скомпонована следующим образом (рис 3).

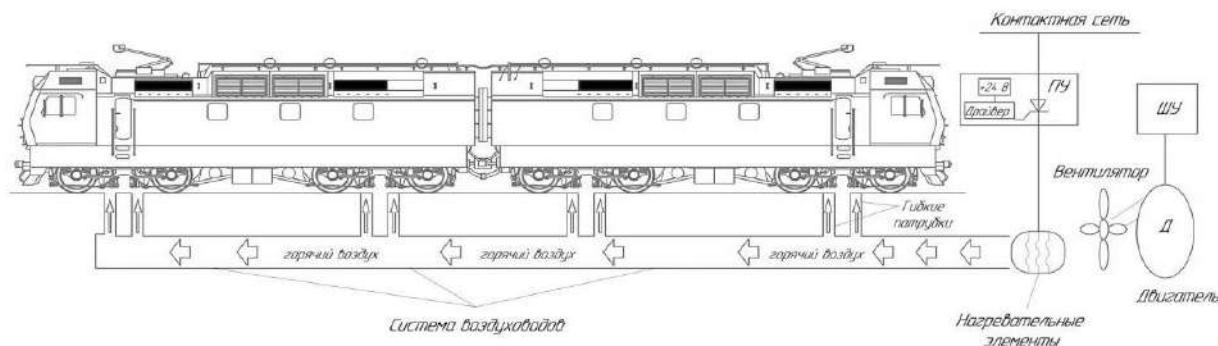


Рис. 3 Схема сушильной установки после автоматизации  
Fig. 3. The scheme of the drying plant after automation

Драйвер подает сигнал +24 В на тиристор, обеспечивая его открытое состояние. При этом состоянии нагревательные элементы начинают подключаться к контактной сети. На поверхности элементов происходит выделение тепла, которое переносится вентилятором через систему воздуховодов к ТЭД электровоза. По истечении 60 минут управляющий сигнал +24 В снимается с тиристора, что позволяет обеспечить его закрытие, нагревательные элементы отключаются от контактной сети. В течение 30 мин. в работу включен только вентилятор. Далее драйвер вновь подает сигнал +24 В на тиристор. Так продолжается до тех пор, пока параметры изоляции не примут установленные значения.

### Разработка алгоритма измерения параметров изоляции тяговых двигателей при выполнении сушки на электровозе 2ЭС6

Для измерения сопротивления изоляции в силовые цепи электровоза 2ЭС6 введены измерители (мегомметры МГМ-1) UZ3 и UZ4, обеспечивающие машиниста или ремонтный персонал информацией о сопротивлении изоляции между обмоткой якоря и корпусом тягового двигателя, выводимой на монитор машиниста (рис. 4).

Данные измерители предлагаются использовать для измерения параметров изоляции тяговых двигателей при выполнении сушки на электровозе 2ЭС6. Блок управления контакто-

рами (БУК) № 7 создает питание катушки реле KL6 (провод 348) в двух случаях:

– при опущенных токоприемниках, когда нажата кнопка «Включение мегомметров» – сигнал на включение мегомметров с блока связи с пультом поступает в микропроцессорную систему управления и диагностики (МПСУиД) и БУК создает цепи питания катушки реле KL6;

– при поднятых токоприемниках – в этом случае МПСУиД через 5 с после выключения ТЭД, но не реже 1 раза в 30 мин., на 95 с включает реле KL6.

Можно выделить два способа автоматизации процесса замера параметров изоляции:

1. Внесение изменений в алгоритм работы МПСУиД, следовательно, внесение изменений как в программное обеспечение, так и в структурное наполнение таких блоков, как блок центрального вычисления, БУК, блок входных сигналов. Данный процесс является трудоемким и материалоёмким, в нем необходимо участие предприятия разработчика и изготовителя, что создаст дополнительные финансовые издержки.

2. Использование не всей системы МПСУиД, а только мегомметров МГМ-1, что не требует внесения изменений в программное обеспечение, конструкцию или замены блоков.

Принцип работы измерителя сопротивления изоляции МГМ-1 заключается в подаче испытательного напряжения на измерительные цепи со встроенным в него источником с пост-

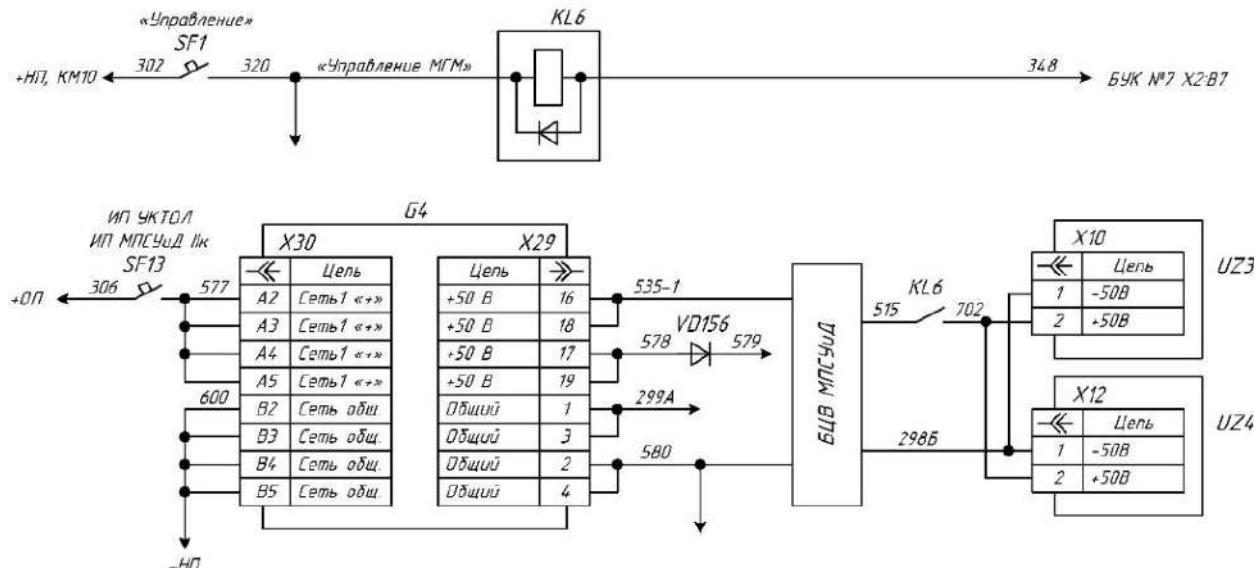


Рис. 4 Схема существующей системы измерения сопротивления изоляции на электровозе 2ЭС6  
Fig. 4. Diagram of the existing insulation resistance measurement system on a 2ES6 electric locomotive

дующим аналого-цифровым преобразованием сигналов и расчетом сопротивления изоляции. Важно, что МГМ-1 имеет встроенное программное обеспечение MGM1ver6.0, с помощью которого самостоятельно производится расчет сопротивления изоляции. Никаких дополнительных усилителей или дешифраторов кодов не требуется, передача «готового» сигнала осуществляется по интерфейсу RS-485. Мегомметры имеют следующие разъемы «+3 000 В» и «-3 000 В» для подключения плюса и минуса от силовой цепи, а также «X1» и «X2», которые предназначены для подачи питания, а также передачи сигнала о значении сопротивления изоляции по интерфейсу RS-485 на удаленную систему сбора информации.

Суть предлагаемого алгоритма заключается в подключении источника питания +50 В к мегомметрам МГМ-1 тяговых двигателей № 1–2, № 3–4, № 5–6 и № 7–8, передаче значения сопротивления по интерфейсу RS-485 от мегомметров на персональный компьютер с выводом информации в виде графиков на монитор диспетчера по ремонту сервисного локомотивного депо (рис. 5). Источник питания через реле времени, настроенное на время 95 с, «включено», 10 мин. «выключено», подает постоянное напряжение +50 В на питание измерителей изоляции тяговых двигателей. Так обеспечивается интервал замера сопротивления не один раз в 60 мин., а 1 раз в 10 мин. Подача +50 В обеспечивает включение мегомметров, непосредственно измерение – подачу испытательного напряжения на электрические цепи и обработку сигнала с последующей передачей.

Стандартная конфигурация персонального компьютера не имеет интерфейс RS-485, но включает COM-порт, имеющий интерфейс RS-232. Поэтому по интерфейсу RS-485 информация о состоянии изоляции поступает на преобразователь интерфейса. Преобразователь интерфейса соединяется с персональным компьютером стандартным кабелем с COM-портом. Персональный компьютер получает информацию с мегомметров под руководством программного обеспечения. Графики состояния изоляции тяговых двигателей строятся программным обеспечением по осям «время» – «сопротивление изоляции».

По значению сопротивления изоляции можно судить об удалении влаги, своевременно отключить калориферную установку от электровоза или перекрыть подачу горячего воздуха к паре двигателей, тем самым исключив «пересушивание» изоляции и образование микротрещин на её поверхности. При достижении сопротивления изоляции 20 МОм на паре ТЭД программное обеспечение подаст сигнал о необходимости прекращения сушки на указанных ТЭД. Дежурным работником осуществляется перекрытие воздуха к высушенной паре. При достижении сопротивления изоляции значения 20 МОм на всем электровозе, программное обеспечение снимает питание с драйвера тиристора, обеспечивая его закрытие и отключение нагревательных элементов от контактной сети. Окончательное выключение вентиляторов производится дежурным работником отключением кнопки шкафа управления – выключается вентилятор обдува. Таким образом, предлагае-

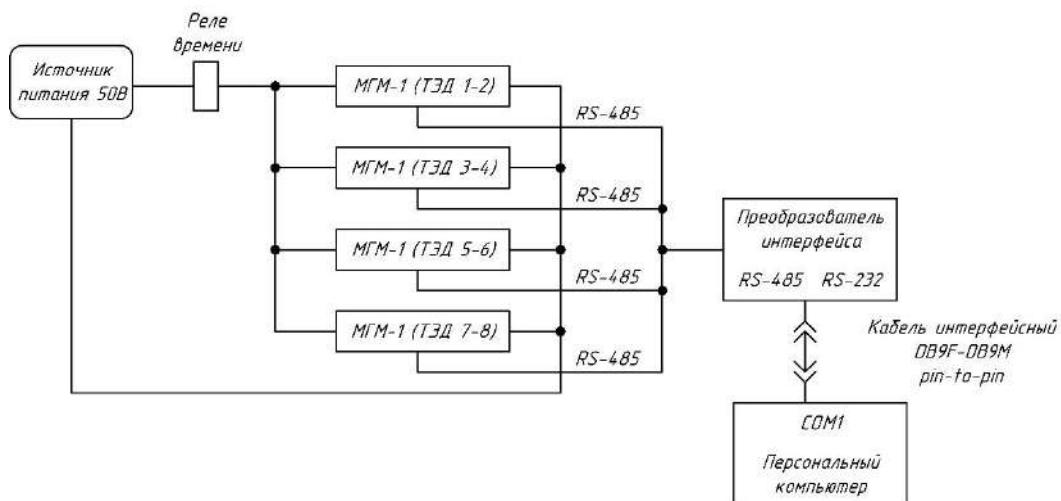


Рис. 5. Схема замера параметров изоляции  
Fig. 5. The scheme of measurement of insulation parameters

мое программное обеспечение позволит отследить значение параметров изоляции с интервалом в 10 мин.

В качестве дальнейшей перспективы предложенного пути совершенствования процесса сушки увлажненной изоляции является разработка технической возможности вычисления коэффициента абсорбции. Также в качестве совершенствования конструкции сушильной установки в дальнейшем предлагается дооснастить ее электрическими заслонками дистанционного управления для перекрытия определенной пары ТЭД по значению коэффициента абсорбции.

Автоматизация измерения таких параметров изоляции ТЭД, как сопротивление и коэффициент абсорбции позволит в режиме реального времени объективно оценивать физическое состояние обмоток и в случае необходимости принять своевременное решение о продолжении или прекращении процедуры сушки.

### Анализ экономической целесообразности

Экономическое обоснование целесообразности применения данного устройства следует из анализа финансовых поступлений и потерь.

Как известно, отказ ТЭД может вызывать простой электровоза, что ведет к финансовым потерям. При плотном графике движения возможна задержка до четырех составов на один аварийный случай. Среднее значение величины убытков от сбоя графика движения поездов может составить до 220 тыс. руб.

Для оценки экономического эффекта это устройство классифицируется как работа, предотвращающая ущербы. Использование разработки приводит к экономии эксплуатационных расходов, снижению затрат на ремонты ТЭД, повышению производительности труда (табл.).

Отток денежных средств на внедрение технологического процесса приблизительно составит 265 тыс. руб. Это стоимость самого устройства.

Целесообразность внедрения основана на снижении расходов и убытков при ремонте и эксплуатации ТЭД. Так как предлагаемое решение восстановит параметры изоляции, сократит время сушки, ожидается следующее:

- снижение расходов на плановые ремонты;
- снижение расходов от времени простоя электровоза на неплановых ремонтах;

Финансовый итог от снижения расходов сократит отток денежных средств от внедрения.

Для оценки экономического эффекта проведен расчет себестоимость сушки изоляции ТЭД до внедрения с учетом взносов в фонды при программе ремонта 800 ед. (средний парк электровозов в сто единиц в депо)  $C_1 = 1\ 180\ 473,27$  руб.

Неплановые ремонты составляют 15% случаев в год от программы ремонта (800 единиц ТЭД). С учетом этого себестоимость сушки изоляции ТЭД составит  $C_1 = 1\ 357\ 544,27$  руб.

Себестоимость сушки ТЭД после внедрения калориферной установки снизится за счет автоматизации процесса и сокращения времени сушки и будет равна  $C_2 = 632\ 597,50$  руб.

Капитальные вложения (в том числе стоимость оборудования, монтаж)  $K_2 = 265\ 000$  руб.

Приведенные затраты  $3_1 = 1\ 357\ 544,27$  руб.;  $3_2 = 632\ 597,50 + 0,15 \cdot 265\ 000 = 672\ 347,50$  руб.

Годовой экономический эффект составит  $\mathcal{E} = 1\ 357\ 544,27 - 672\ 347,50 = 685\ 196,77$  руб.

Наличие экономического эффекта говорит о целесообразности внедрения нового метода сушки изоляции ТЭД. Срок окупаемости при этих условиях равен:

$$T = 265\ 000 / (1\ 357\ 544,27 - 632\ 597,5) \approx 0,4 \text{ года.}$$

Экономический эффект достигается за счет снижения оттока средств на плановые и неплановые ремонты по восстановлению работоспособности ТЭД. Это происходит за счет автоматизации процесса сушки изоляции, оптимизации самого процесса по времени, более тонкой настройки установки и повышения производительности труда.

### Заключение

Исходя из сказанного, сделан вывод о необходимости внедрения предлагаемой установки.

Предлагаемый процесс сушки обмоток электровозов 2ЭС6 позволит:

- автоматизировать измерения сопротивления и коэффициента абсорбции, что будет способствовать объективной оценке физического состояния обмоток и принятию своевременного решения о продолжении или прекращении сушки;

- сократить продолжительность процесса сушки изоляции на калориферной установке;

- фиксировать оперативную информацию по параметрам изоляции ТЭД в процессе сушки для последующего анализа и оптимизации процесса.

## Список литературы

1. Гордеев И.П., Калякулин А.Н., Тычков А.С. Исследование диэлектрических параметров изоляции силовых цепей электровозов // Наука и образование транспорту. 2014. № 1. С. 13-15.
2. Диагностирование тяговых электродвигателей локомотивов с учетом диэлектрических свойств изоляции / А.Н. Калякулин, А.Ю. Балакин, А.С. Тычков, П.В. Шепелин // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» (в 3-х частях). Омск, 10–11 декабря 2015 года. Омск: ОмГУПС, 2015. Т. 1. С. 231–236.
3. Калякулин А.Н., Тычков А.С., Анахова М.В. Анализ схем включения реле защиты от заземления в силовых цепях тепловозов // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 1(67). С. 11-16.
4. Калякулин А.Н., Тычков А.С., Силаев В.А. Выравнивание рабочего напряжения в изоляции обмоток тяговых электродвигателей тепловозов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 2. С. 375-387.
5. Влияние увлажнения на безотказность изоляции ТЭМ электровозов / Ю.И. Попов, В.П. Смирнов, С.И. Баташов, Р.С. Чубов // Труды международной интернет-конференции «Современные проблемы железнодорожного транспорта». Москва, 07 апреля 2020 года. М. : Российский университет транспорта, 2020. С. 425-428.
6. Яковлев К.Н., Саланов А.Е. Анализ случаев неплановых видов ремонта электровозам серии 2ЭС6 в Свердловской дирекции тяги // Материалы Международной научно-практической конференции «Синтез науки и образования как механизм перехода к постиндустриальному обществу». Таганрог, 12 апреля 2021 года. Уфа: ООО «ОМЕГА САЙНС», 2021. С. 50-55.
7. Буйносов А.П., Худояров Д.Л., Тюшев И.А. Разработка алгоритма диагностики тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 «Синара» // Транспорт Урала. 2021. № 4(71). С. 74-79. DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-74-79.
8. Распоряжение ОАО «РЖД» от 20 января 2012 г. № 77р «Об утверждении Инструкции по подготовке к работе и техническому обслуживанию электровозов в зимних и летних условиях».
9. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. Часть 9. Техническое обслуживание и текущий ремонт. 2ЭС6.00.000.000 РЭ8. Екатеринбург: Уральские локомотивы, 2011. 326 с.
10. Экспериментальные исследования основных электротехнических параметров изоляции тяговых двигателей электровозов при сушке разными способами / Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, А.М. Худоногов [и др.] // Транспорт Урала. 2020. № 3(66). С. 72-75. DOI 10.20291/1815-9400-2020-3-72-75.
11. Сравнительные экспериментальные исследования основных электротехнических параметров изоляции электротехнического оборудования после сушки различными способами / В.А. Кручек, Е.Ю. Дульский, А.А. Воробьев, Е.И. Макарова // Электротехника. 2021. № 2. С. 18-20.
12. Пат. 2324278 Рос. Федерация. Способ сушки изоляции электрических машин / Д.В. Коноваленко, Р.Ю. Упрырь, А.М. Худоногов. № 2006143925 ; заявл. 11.12.2006 ; опубл. 10.05.2008, Бюл. № 13. 4 с.
13. Пат. 2494517 Рос. Федерация. Трехциклический амплитудно-широкото-прерывный способ сушки изоляции электрических машин / В.В. Сидоров, Е.М. Лыткина, Д.В. Коноваленко [и др.]. № 2011150204 ; заявл. 09.12.2011 ; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27. 6 с.
14. Пат. 2398340 Рос. Федерация. Установка для сушки изоляции обмоток электрических машин / Д.В. Коноваленко, А.М. Худоногов, Е.К. Ревизоров. № 2009106314: заявл. 24.02.2009 ; опубл. 27.08.2010, Бюл. №24. 6 с.
15. Пат. 2525296 Рос. Федерация. Селективный способ сушки увлажненной или пропитанной изоляции обмоток якоря тяговых электрических машин инфракрасным излучением и устройство для его реализации / А.М. Худоногов, Е.М. Лыткина, Е.Ю. Дульский [и др.]. № 2012143541: заявл. 11.10.2012 ; опубл. 10.08.2014, Бюл. №22. 6 с.
16. Пат. 2569337 Рос. Федерация. Инфракрасно-конвективно-вакуумный способ сушки изоляции обмоток магнитной системы остова тяговой электрической машины и устройство для его реализации / А.М. Худоногов, Е.М. Лыткина, Е.Ю. Дульский [и др.]. № 2012145098: заявл. 23.10.2012 ; опубл. 20.11.2015, Бюл. №32. 6 с.
17. Dulsky E.Yu., Ivanov P.Yu., Khudonogov A.M., Khudonogov I.A. A functional approach to the analysis of technological processes of using thermal radiation in the process of repairing insulation of electric locomotive equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, May 21–24, 2019. Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012019. DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012019.
18. Sidorova A., Cheremukhin A., Semenov D., Astakhova T. Algorithm for Determining the State of Impregnated Paper Insulation of High-Voltage Cables // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2019. Vol. 20. No 4. P. 20190002. DOI 10.1515/ijeps-2019-0002.

## References

1. Gordeev I.P., Kalyakulin A.N., Tychkov A.S. Issledovanie dielektricheskikh parametrov izolyatsii silovykh tsepej elektrovozov [Investigation of dielectric insulation parameters of electric locomotive power circuits]. Nauka i obrazovanie transportu [Science and education for transport]. 2014, no 1, pp. 13-15.
2. Kalyakulin A.N., Balakin A.Yu., Tychkov A.S., Shepelin P.V. Diagnostirovaniye tyagovykh elektrodvigatelei lokomotivov s uchetom dielektricheskikh svoistv izolyatsii [Diagnostics of traction electric motors of locomotives taking into account the dielectric properties of insulation]. Materialy III Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnoego podvizhnogo sostava» (v 3-kh chastyakh) [Proceedings of the III All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation «Technological support of repair and improvement of dynamic qualities of railway rolling stock» (in 3 parts)]. Omsk, 2015. Vol. 1, pp. 231-236.
3. Kalyakulin A.N., Tychkov A.S., Anakhova M.V. Analiz skhem vkljucheniya rele zashchity ot zazemleniya v silovykh

tsepyakh teplovozov [Analysis of circuits for switching on the grounding protection relay in the power circuits of diesel locomotives]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region]. 2018, no 1(67), pp. 11–16.

4. Kalyakulin A.N., Tychkov A.S., Silaev V.A. Vyravnivanie rabochego napryazheniya v izolyatsii obmotok tyagovykh elektrosvigatelei teplovozov [Equalization of the operating voltage in the insulation of the windings of traction electric motors of locomotives]. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences]. 2019, no 2, pp. 375–387.

5. Popov Yu.I., Smirnov V.P., Batashov S.I., Chubov R.S. Vliyanie uvlazhneniya na bezotkaznost' izolyatsii TEM elektrovozov [The effect of humidification on the reliability of insulation of TEM electric locomotives]. *Trudy mezhdunarodnoi internet-konferentsii «Sovremennye problemy zhelezodorozhnoi transporta»* [Proceedings of the International Internet conference «Modern problems of railway transport»]. Moscow, 2020, pp. 425–428.

6. Yakovlev K.N., Salanov A.E. Analiz sluchaei neplanovykh vidov remonta elektrovozam serii 2ES6 v Sverdlovskoy direktssi tyagi [Analysis of cases of unplanned types of repair of electric locomotives of the series 2ES6 in the Sverdlovsk Directorate of Traction]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sintez nauki i obrazovaniya kak mekhanizm perekhoda k postindustrial'nому obshhestvu»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Synthesis of Science and Education as a Mechanism of Transition to Post-Industrial Society】. Ufa, 2021, pp. 50–55.

7. Buynosov A.P., Khudoyarov D.L., Tyushev I.A. Razrabotka algoritma diagnostiki tyagovykh elektrosvigatelei elektrovozov 2ES6 «Sinara» [Development of an algorithm for diagnosing traction electric motors of electric locomotives 2ES6 «Sinara】]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2021, no 4(71), pp. 74–79. DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-74-79.

8. Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 20 yanvarya 2012 g. № 77r «Ob utverzhdenii Instruktsii po podgotovke k rabote i tekhnicheskому obsluzhivaniyu elektrovozov v zimnikh i letnikh usloviyakh» [Order of JSC «Russian Railways» dated January 20, 2012 no 77p «About the approval of the Instruction on preparation for operation and maintenance of electric locomotives in winter and summer conditions»].

9. Elektrovoz gruzovoi postoyannogo toka 2ES6 s kollektornymi tyagovymi elektrosvigatelyami. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Chast' 9. Tekhnicheskoe obsluzhivanie i tekushchii remont. 2ES6.00.000.000 RE8. [DC freight electric locomotive 2ES6 with brushed traction motors. Instruction Manual. Part 9. Maintenance and current repairs. 2ES6.00.000.000 UM8]. Ekaterinburg: Ural'skie lokomotivnye Publ., 2011. 326 p.

10. Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Khudonogov A.M. Novikov N.N., Divinets M.A. Eksperimental'nye issledovaniya osnovnykh elektrotekhnicheskikh parametrov izolyatsii tyagovykh dvigatelei elektrovozov pri sushke raznymi sposobami [Experimental studies of the main electrotechnical parameters of insulation of traction motors of electric locomotives at the drying of different ways]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2020, no 3(66), pp. 72–75. DOI 10.20291/1815-9400-2020-3-72-75.

11. Kruchek V.A., Dulskii E.Yu., Vorobyov A.A., Makarova E.I. Sravnitel'nye eksperimental'nye issledovaniya osnovnykh elektrotekhnicheskikh parametrov izolyatsii elektrooborudovaniya posle sushki razlichnymi sposobami [Comparative experimental studies of the main electrotechnical parameters of insulation of electrical equipment after drying by various ways]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2021, no 2, pp. 18–20.

12. Konovalenko D.V., Upyr' R.Yu., Khudonogov A.M. Patent RU 2324278 C1, 10.05.2008.

13. Sidorov V.V., Lytkina E.M., Konovalenko D.V., Khudonogov A.M., Garev N.N., Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Patent RU 2494517 C2, 27.09.2013.

14. Konovalenko D.V., Khudonogov A.M., Revizorov E.K. Patent RU 2398340 C1, 27.08.2010.

15. Khudonogov A.M., Lytkina E.M., Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Garev N.N., Vyzhimova V.N. Patent RU 2525296 C2, 10.08.2014.

16. Khudonogov A.M., Lytkina E.M., Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Garev N.N., Vyzhimova V.N. Patent RU 2569337 C2, 20.11.2015.

17. Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Khudonogov A.M., Khudonogov I.A. A functional approach to the analysis of technological processes of using thermal radiation in the process of repairing insulation of electric locomotive equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, May 21–24, 2019. Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012019. DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012019.

18. Sidorova A., Cheremukhin A., Semenov D., Astakhova T. Algorithm for Determining the State of Impregnated Paper Insulation of High-Voltage Cables // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2019. Vol. 20. No 4. P. 20190002. DOI 10.1515/ijeeps-2019-0002.

### Информация об авторах

**Калякулин Алексей Николаевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры электрического транспорта, Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, e-mail: Alexeiruz@yandex.ru

**Анахова Марина Вениаминовна**, канд. техн. наук, доцент кафедры электрического транспорта, Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, e-mail: amv-63@mail.ru

**Тычков Александр Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры электрического транспорта, Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, e-mail: al2000@rambler.ru

### Information about the authors

**Alexei N. Kalyakulin**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Electric Transport», Samara State Transport University, Samara, e-mail: Alexeiruz@yandex.ru

**Marina V. Anakhova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Electric Transport», Samara State Transport University, Samara, e-mail: amv-63@mail.ru

**Alexander S. Tychkov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Electric Transport», Samara State Transport University, Samara, e-mail: al2000@rambler.ru

## Математическая модель прогнозирования среднесуточного пробега локомотивов

О. О. Мухин✉

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

✉ muhinoo@mail.ru

### Резюме

Одним из актуальных направлений совершенствования системы поддержки жизненного цикла тягового подвижного состава является повышение качества организации сервисного обслуживания. Несмотря на массовое обновление локомотивного парка железных дорог России, при достаточной мощности сервисных предприятий сохраняется длительный простой в ожидании планового ремонта, что приводит к непроизводительным потерям. Это связано со снижением точности планирования программы ремонта в условиях стремительного развития локомотивного комплекса и инфраструктуры (повышения скоростей движения, пропускной способности железных дорог), ввиду чего появляется необходимость актуализации существующей методики планирования ремонтов локомотивов. Автором на основе метода спектрального сингулярного анализа временных рядов SSA (Singular Spectrum Analysis) в программном пакете компьютерной алгебры Maple разработана и представлена математическая модель прогнозирования среднесуточного и линейного пробегов локомотива. Произведена проверка адекватности результатов путем сопоставления полученных данных со значениями специализированной программы CaterpillarSSA. На примере локомотивного парка серии 3ЭС5К, эксплуатируемого в границах Восточного полигона, при планировании программы ремонта проведено сравнение результатов математической модели с методикой, действующей на российской сети железных дорог. Сделан вывод об эффективности разработанного решения. Математическая модель отличается от существующего метода тем, что позволяет учесть технико-технологические, сезонные и случайные факторы, негативно влияющие на достоверность прогноза, позволяет с большей точностью определить дату наступления соответствующего вида ремонта. Модель также может быть применена в отношении любого вида транспорта, для которого межремонтный период нормирован пробегом.

### Ключевые слова

тяговый подвижной состав, электровоз, ремонт локомотивов, планирование ремонтов, Singular Spectrum Analysis, среднесуточный пробег

### Для цитирования

Мухин О. О. Математическая модель прогнозирования среднесуточного пробега локомотивов / О. О. Мухин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 123–132. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).123-132

### Информация о статье

поступила в редакцию: 09.03.2022 г.; поступила после рецензирования: 16.03.2022 г.; принята к публикации: 18.03.2022 г.

## Mathematical model for the locomotive average daily mileage forecasting

О. О. Mukhin✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ muhinoo@mail.ru

### Abstract

One of the urgent directions of improving the life cycle support system of traction rolling stock is through the improvement in the quality of the service organization. Despite the massive renewal of the locomotive fleet of Russian railways, with sufficient capacity of service enterprises, a long downtime still remains due to the wait for scheduled maintenance, which leads to unproductive losses. This becomes possible due to a decrease in the accuracy of the repair program planning service under the conditions of rapid development of the locomotive complex and infrastructure as well as the increasing traffic speeds and railway capacity. Which is why, there is a need to update the existing method of planning the locomotive repair request. Based on the method of spectral singular analysis of time series SSA (Singular Spectrum Analysis) in the Maple computer algebra software package, the author has developed and presented a mathematical model for predicting the locomotive average daily and linear runs. The adequacy of the results was verified by comparing the data obtained with the values of the specialized Caterpillar SSA program. Using the 3ES5K series locomotive fleet operated within the boundaries of the Eastern Polygon, when planning the repair program a comparison of the results of the mathematical model with the methodology operating on the railway network of JSC "Russian Railways" was carried out. The conclusion is made about the effectiveness of the developed solution. The mathematical model differs from the existing method by the possibility to consider technical, technological, seasonal and random factors that negatively affect the reliability of the forecast, allowing a more accurate determination of the date for the appropriate type of repair. The model can also be applied to any type of transport whose inter-repair period is normalized by mileage.

**Keywords**

traction rolling stock, electric locomotive, locomotive repair, repair planning, Singular Spectrum Analysis, average daily mileage of a locomotive

**For citation**

Mukhin O. O. Matematicheskaya model' prognozirovaniya srednesutochnogo probega lokomotivov [Mathematical model for the locomotive average daily mileage forecasting]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2022, No. 1 (73), pp. 123–132. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).123-132

**Article Info**

Received: 09.03.2022; revised: 16.03.2022; accepted: 18.03.2022.

**Введение**

Задачей планово-предупредительной системы ремонта тягового подвижного состава является поддержка требуемого технического состояния узлов и оборудования, предупреждение отказов технических средств. По данным автоматизированного рабочего места для анализа отчетных и номерных данных (АРМ ОНД) в среднем за год текущий ремонт первого объема (ТР-1) проводится локомотивному парку ОАО «РЖД» 32019 раз, второго объема (ТР-2) – 2835, третьего (ТР-3) – 1073, средний ремонт (СР) – 724 и капитальный (КР) – 574. На качество организации сервисного обслуживания, безусловно, в первую очередь влияет точность планирования постановки локомотивов на ремонт, что предоставляет возможность определить необходимое наличие запасных частей, линейного оборудования, распределить объемы работ между сервисными компаниями, оценить трудоемкость процессов, всевозможные расходы [1].

При достижении соответствующего межремонтного пробега локомотив направляют на базу сервисного предприятия для ожидания очереди на ремонтную позицию. По данным информационных систем средний простой в ожидании ТР-1 составляет 1,3 сут, ТР-2 – 2,1 сут, ТР-3 – 5,1 сут, простой в ожидании заводских ремонтов СР – 13,3 сут и КР – 16,2 сут. Длительный простой приводит к финансовым потерям, вызванным не содержанием заданного количества локомотивов в эксплуатируемом парке, а потреблением электроэнергии, топлива в период ожидания («горячий простой»).

Ошибочно утверждать, что только вследствие некорректной программы ремонта возможен непроизводительный простой, существует множество технико-технологических, сезонных, случайных и административных факторов, в разной мере влияющих на соответствие плановой и фактической даты наступления нормативного пробега [1]. Сегодня приме-

няемая на сети ОАО «РЖД» методика планирования потребности в ремонтах не позволяет учесть вышеуказанные факторы, искомая дата определяется по значению среднего в текущем году среднесуточного пробега для каждого локомотива в парке. Еще не существует модуля планирования, интегрированного с информационными системами холдинга, расчет не полностью автоматизирован и производится в Microsoft Excel.

В рамках новой концепции поставки железнодорожной продукции на основе контракта жизненного цикла, в условиях стремительного развития инфраструктуры и локомотивного комплекса направление планирования программы ремонта подвижного состава до настоящего времени останется недостаточно исследованным. Более того, Стратегией развития транспортного машиностроения РФ на период до 2030 г. отмечена необходимость в переходе к новой системе планирования.

В целях повышения точности, автоматизации процесса планирования ремонтов, появляется необходимость в разработке математической модели прогнозирования среднесуточного и линейного пробегов, которая позволит получить достоверный результат с учетом влияния различных факторов.

### Анализ динамики среднесуточного пробега методом спектрального сингулярного анализа временных рядов

Для решения поставленной задачи в работе использован метод спектрального сингулярного анализа временных рядов SSA (Singular Spectrum Analysis) [2, 3], результатом которого является разложение временного ряда на простые компоненты: медленные тренды, сезонные и другие периодические или колебательные составляющие, а также шумовые компоненты [2–7]. В настоящее время метод широко используется для определения состояния изоляции сило-

вых цепей электровозов переменного тока [8], прогнозирования стоимости электроэнергии [8, 9], грузоперевозок на железнодорожном транспорте [10], суточных объемов пассажирских перевозок в Московском метрополитене [11], и т.д., а также может быть использован в любых других областях науки [2–14].

Базовый алгоритм SSA основан на анализе временного ряда конечной длины и представлении значений ряда в виде суммы интерпретируемых компонент, состоит из двух основных этапов: вложение и восстановление [3–8]. Алгоритм реализован автором в программном пакете компьютерной алгебры Maple. Для построения и управления матрицами и векторами используются пакеты linalg, LinalgAlgebra, MTT [15, 16].

На первом этапе выполняется преобразование исходного временного ряда из  $N$  значений в последовательность  $K = N - L + 1$  векторов-столбцов вложения протяженностью  $L$  [2, 8], где  $L$  – длина окна, как правило принимается в диапазоне от 2 до  $N/2 - 1$ . В результате образуется траекторная матрица  $L \times K$ , которая имеет следующий вид:

$$X = \begin{vmatrix} S_1 & S_2 & \cdots & S_K \\ S_2 & S_3 & \cdots & S_{K+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_L & S_{L+1} & \cdots & S_N \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где  $S_1 \dots S_N$  – значения временного ряда.

Анализируемые данные представляют собой динамику среднесуточного пробега магистральных электровозов серии 3ЭС5К приписки Дальневосточной дирекции тяги с января 2015 по декабрь 2021 г., протяженностью  $N = 84$  месяца ( $S_{84}$ ), рис. 1.

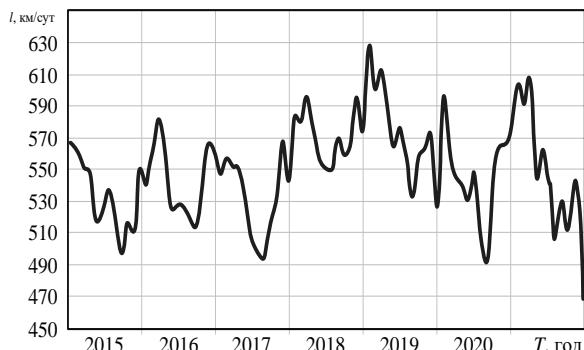


Рис. 1. Динамика среднесуточного пробега  
Fig. 1. Dynamics of average daily mileage

Длина окна  $L$  принимается равной 10, тогда  $K = 84 - 10 + 1 = 75$ . Исходные данные легко можно преобразовать в траекторную матри-

цу (1)  $10 \times 75$  с помощью команды Maple « $\mathbf{X} := \text{matrix}(L, K, (i, j) \rightarrow S_N[i - 1 + j])$ ».

Далее необходимо выполнить процедуру SVD-разложения (Singular Value Decomposition) траекторной матрицы  $\mathbf{X}$  [3–8], представленной как:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X} &= \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T = \sum_{i=1}^L \mathbf{X}_i \\ \mathbf{X}_i &= \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\Sigma$  – диагональная матрица сингулярных чисел;  $\sigma_i$ ;  $\mathbf{u}_i$ ,  $\mathbf{v}_i$  – левые и правые сингулярные векторы ортогональных матриц  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{V}$ ;  $\mathbf{X}_i$  – элементарная матрица, компонент траекторной матрицы  $\mathbf{X}$  [2, 3, 8].

SVD-разложение также может быть представлено в виде собственных значений ковариационной матрицы:

$$\mathbf{X} \mathbf{X}^T = \mathbf{U} \Lambda \mathbf{U}^T \quad (3)$$

где  $\Lambda$  – диагональная матрица собственных значений  $\lambda_i = \sigma_i^2$ ;  $\mathbf{U}$  – ортонормированная система собственных векторов ковариационной матрицы.

В Maple уравнение (2) можно реализовать следующим образом « $\mathbf{U}, \Sigma, \mathbf{V}^T := \text{SingularValues}(\text{matrix}(\mathbf{X}), \text{output} = [\mathbf{U}', \Sigma', \mathbf{V}'^T])$ », а уравнение (3) как « $\mathbf{U}, \Sigma, \mathbf{V}^T := \text{SingularValues}(\text{matrix}(\mathbf{X} \cdot \text{transpose}(\mathbf{X})), \text{output} = [\mathbf{U}', \Sigma', \mathbf{V}'^T])$ » [15, 16].

Правый сингулярный вектор матрицы  $\mathbf{V}$  определяется как

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{X}^T \mathbf{u}_i / \sigma_i$$

Таким образом, SVD-разложение траекторной матрицы  $\mathbf{X}$  можно представить в виде  $\mathbf{X} = \mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \dots + \mathbf{X}_{10}$ .

Сингулярный спектр временного ряда, определяющий вклад собственного значения  $\lambda_i$  в формирование траекторной матрицы  $\mathbf{X} \mathbf{X}^T$ , можно рассчитать следующим способом:

$$C_i = \sigma_i^2 / \sum_{j=1}^L \sigma_j^2 \quad (4)$$

На рис. 2 представлены значения сингулярного спектра, полученные по уравнению (4), собственных значений  $\sigma_i^2$  матрицы  $\mathbf{X}$  динамики среднесуточного пробега. Таким образом, наибольший вклад собственного значение в формирование временного ряда вносит первая компонента  $\mathbf{X}_1$  (99,8 %), компонента  $\mathbf{X}_2$  (0,09 %) характеризует сезонность в динамике,  $\mathbf{X}_3$  и далее – шум, случайные факторы.

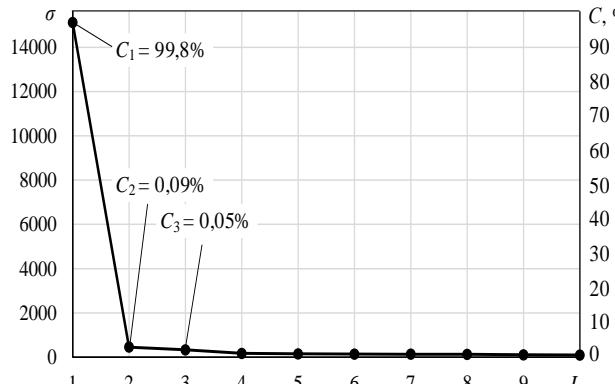


Рис. 2. График зависимости собственных значений и сингулярного спектра

Fig. 2. Graph of the dependence of eigenvalues and singular spectrum

После разложения наступает этап восстановления, на котором в первую очередь необходимо выполнить объединение набора из \$L\$ элементарных матриц \$\mathbf{X}\_i\$ в \$r\$ непересекающихся групп \$\mathbf{X}\_{Ik}\$, тогда представление матрицы \$\mathbf{X}\$ принимает следующий вид:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \sum_{m=1}^r \mathbf{X}_{Ik},$$

где \$\mathbf{X}\_{Ik}\$ — результирующая матрица группы.

В данном случае количество непересекающихся групп принимается \$r = 4\$, т. е. \$\mathbf{X}\_1 + \mathbf{X}\_2\$, \$\mathbf{X}\_3 + \mathbf{X}\_4\$, \$\mathbf{X}\_5 + \mathbf{X}\_6\$, \$\mathbf{X}\_7 + \mathbf{X}\_8\$.

Далее необходимо произвести диагональное усреднение путем преобразования сгруппированной матрицы в новый временной ряд той же длины \$N\$ по следующему выражению:

$$x_n^k = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n x_{m,n-m+1} & \text{при } 1 \leq n < K \\ \frac{1}{L} \sum_{m=1}^L x_{m,n-m+1} & \text{при } L \leq n < K \\ \frac{1}{N-n+1} \sum_{m=n-K+1}^n x_{m,n-m+1} & \text{при } K+1 \leq n < K \end{cases},$$

где \$x\_{m,n-m+1}\$ — элемент матрицы в соответствующей строке и столбце. Другими словами, процедура приводит к получению серии элементов \$x\_n^k\$ временного ряда. Диагональное усреднение также применяется в отдельности к каждой матрице группы \$\mathbf{X}\_{Ik}\$ или \$\mathbf{X}\_i\$.

На рис. 3 представлены результаты разложения динамики среднесуточного пробега на графики тренда (\$\mathbf{X}\_{Ik1}\$), сезонной (\$\mathbf{X}\_{Ik2}\$) и шумо-

вой компонент (\$\mathbf{X}\_{Ik3}\$, \$\mathbf{X}\_{Ik4}\$). Имея представление о наличии технико-технологических, сезонных и случайных факторов в динамике, появляется возможность с большей точностью произвести прогноз.

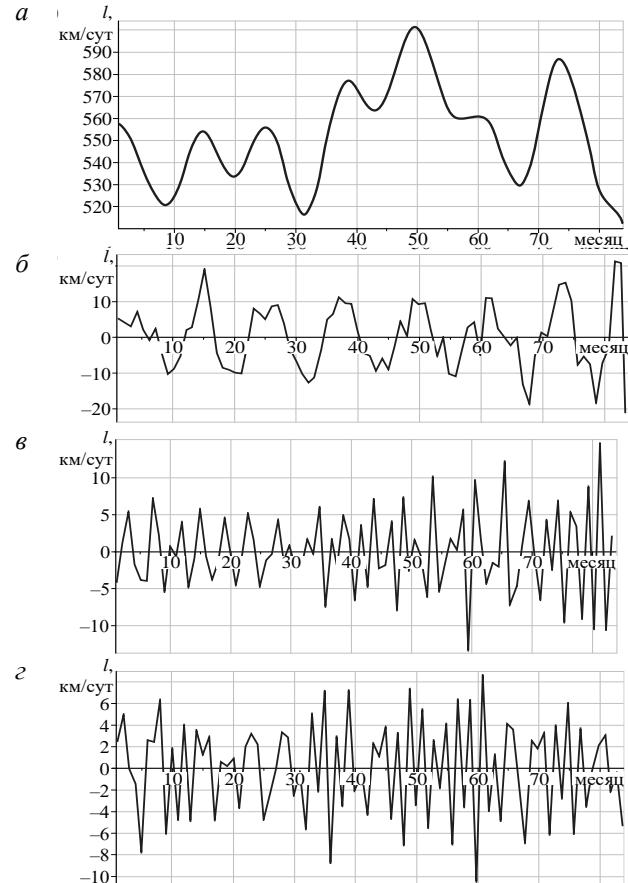


Рис. 3. Разложение динамики среднесуточного пробега: а) тренд динамики; б) сезонная компонента; в, г) шумовая компонента

Fig. 3. The dynamics layout of the average daily mileage: a) trend dynamics; b) seasonal component; c, d) noise component

### Прогнозирование среднесуточного пробега

Прогнозирование временного ряда на \$p\$ точек вперед производится в соответствии с линейной рекуррентной формулой (ЛРФ):

$$\tilde{x}_{N+p} = \sum_{k=1}^{L-1} a_k x_{N+1-k},$$

где \$a\_k\$ — коэффициент ЛРФ; \$x\_{N+1-k}\$ — значение восстановленного временного ряда.

Матрица \$U\$ ортого нормированных собственных векторов матрицы \$\mathbf{X}\mathbf{X}^T\$ можно представить в следующем виде:

$$U = \begin{vmatrix} u_1^{i_1} & u_1^{i_2} & \dots & u_1^{i_r} \\ u_2^{i_1} & u_2^{i_2} & \dots & u_2^{i_r} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ u_{L-1}^{i_1} & u_{L-1}^{i_2} & \dots & u_{L-1}^{i_r} \\ u_L^{i_1} & u_L^{i_2} & \dots & u_L^{i_r} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_{L-1}^r \\ u_1^r \end{vmatrix},$$

где  $U_{L-1}^r$  – матрица размером  $(L-1) \times r$ , полученная из первых  $L-1$  строк матрицы  $U$ ;  $u_1^r$  – вектор-строка длиной  $r$ , является последней строкой матрицы  $U$ .

Коэффициенты ЛРФ определяются по следующему выражению:

$$(a_{L-1}, \dots, a_1)^T = \frac{1}{1-v^2} \left[ U_{L-1}^r \cdot (u_1^r)^T \right],$$

где  $v$  – коэффициент вертикальности пространства, рассчитываемый по значениям нижней строки матрицы  $U$  [3, 8] как:

$$v^2 = (u_L^{i_1})^2 + \dots + (u_L^{i_r})^2.$$

На рис. 4 представлены результаты прогнозирования среднесуточного пробега электровозов, ожидаемое значение на конец января 2022 г. – 535,69 км/сут.

В целях верификации математической модели, разработанной в Maple, проведено сравнение полученных результатов среднесуточного пробега с результатами специализированной программы CaterpillarSSA. На рис. 5 изображен график анализируемого ряда [17–21]. Ожидаемый пробег в соответствии с CaterpillarSSA составляет 535,677 км/сут. Таким образом, разница в расчетах не значительна (0,003 %), что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

Кроме того, в пользу достоверности прогноза, по данным АРМ ОНД фактический среднесуточный пробег для локомотивов серии 3ЭС5К по итогам января 2022 года составил 519,49 км/сут, ошибка прогнозирования 3,02 %.

Математическая модель также может быть использована для анализа и прогнозирования любого другого временного ряда.

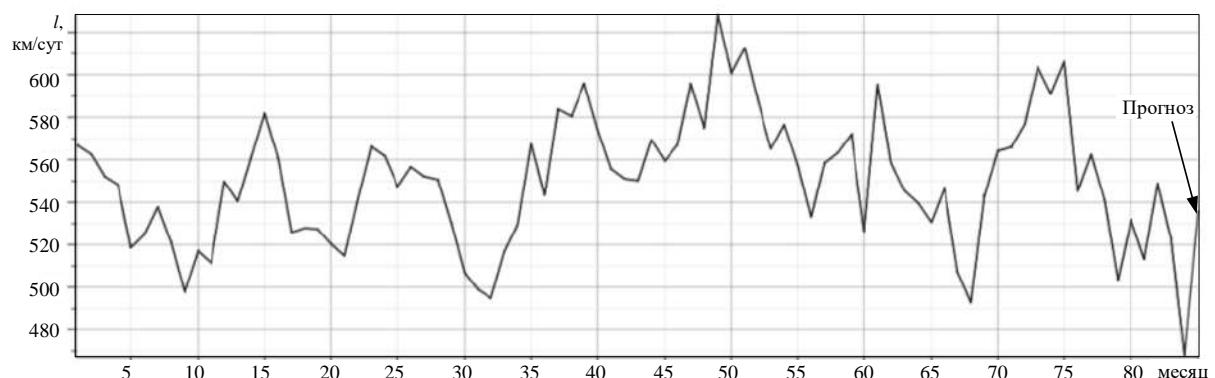


Рис. 4. Прогнозирование среднесуточного пробега в Maple  
Fig. 4. Forecasting the average daily mileage in the Maple

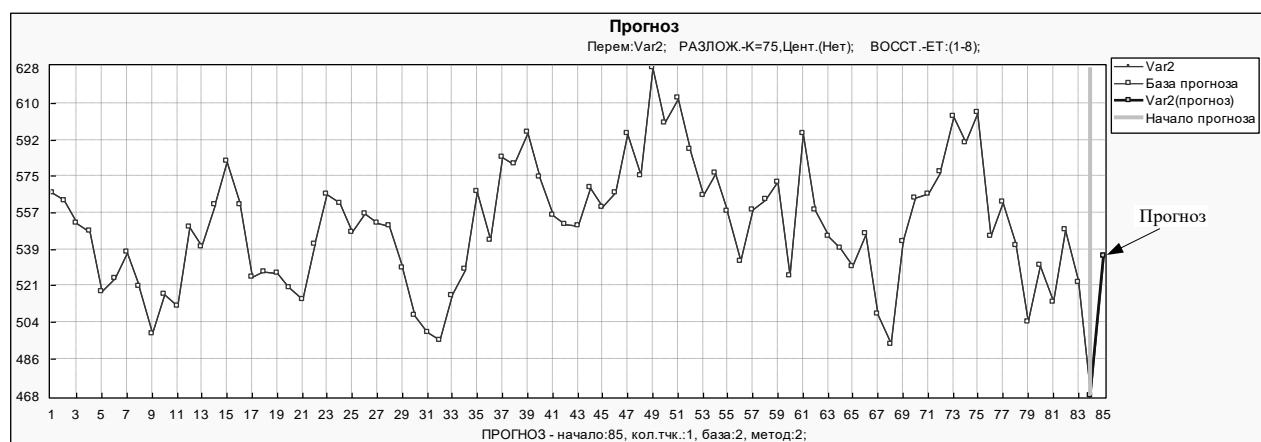


Рис. 5. Прогнозирование среднесуточного пробега в программе CaterpillarSSA  
Fig. 5. Forecasting the average daily mileage in the CaterpillarSSA program

## Планирование программы ремонта локомотива

Выполнение прогноза среднесуточного пробега на длительный период позволит спланировать программу ремонта локомотивов. Для этого к прогнозируемому временному ряду целесообразно применить сплайновую (многоинтervальную) интерполяцию по следующей формуле [15, 16]:

$$f(t) = \sum_{k=0}^p a_{ik} t^k, \quad (5)$$

где  $t_{i-1} \leq t \leq t_i$ ,  $a_{ik}$  – числовой коэффициент, определяемый путем решения системы линейных уравнений;  $p$  – количество элементов в прогнозируемом ряду;  $t$  – временной параметр, в данном случае приняты сутки. В Maple пакет Statistics дает возможности реализовать интерполяцию.

Интеграл функции (5) позволит определить линейный пробег локомотива:

$$L_{\text{лин}}(t) = \int_{t_0}^T f(t) dt, \quad (6)$$

где  $t_0$  – начало прогнозируемого периода, сут;  $T$  – окончание прогнозируемого периода, сут. По полученной зависимости линейного пробега от пройденных суток возможно определить дату наступления искомого межремонтного пробега.

На примере локомотивного парка ЗЭС5К проведено сравнение фактических дат наступления пробега для выполнения цикловых работ в объеме СР (1 000 000 км) в 2020 году с планируемыми, рассчитанными по действующей методике (в рамках 2020 г.) и в соответствии с математической моделью [22, 23]. На рис. 6 представлены графики среднесуточного пробега трех электровозов, где исходные значения представляют собой временной ряд 1 за период с января 2018 по декабрь 2019 г. Прогнозируемая динамика 2 по своей форме схожа с формой кривой фактических значений 3.

По выражению (6) выполнен расчет линейного пробега для группы локомотивов, определены даты. Результаты сравнения представлены в табл. 1. Среднее отклонение дат, полученных по существующей методике, 21,53 сут., а по метаматематической модели 10,88 сут.. Планирование программы ремонта в объеме СР с применением SSA-метода прогнозирования на 49,45 % эффективней.

Аналогичным образом выполнено сравнение наступления дат межремонтного пробега для выполнения цикловых работ локомотивами в объеме ТР-3 (500 000 км). На рис. 7 представлены графики среднесуточного пробега, в табл. 2 – результаты сравнения. В этом случае эффективность модели составляет 41,96 % по отношению к действующей методике.

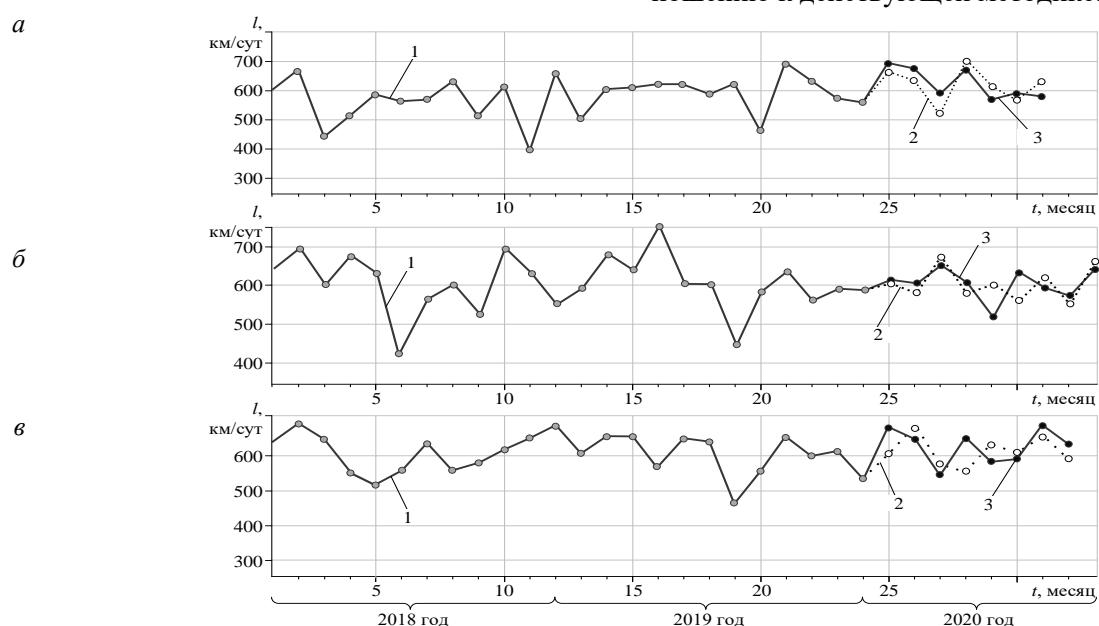
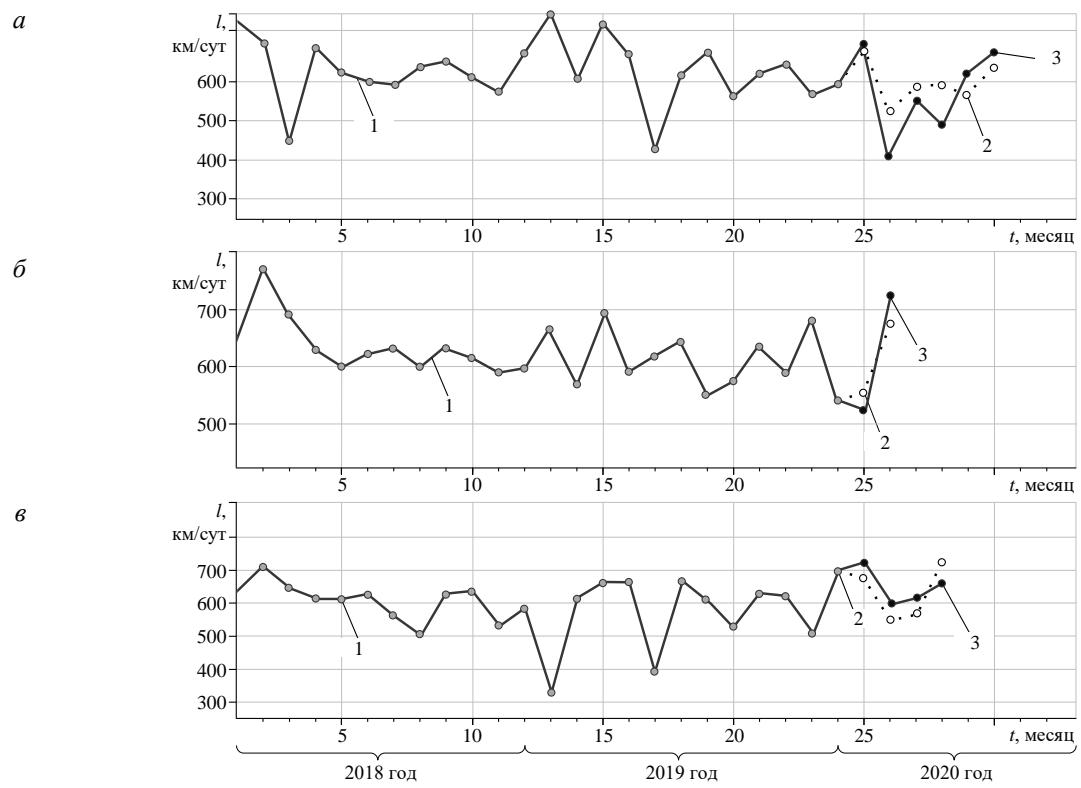


Рис. 6. Прогноз динамики среднесуточного пробега электровозов: а) локомотив № 102; б) локомотив № 72; в) локомотив № 110; 1 – исходные значения; 2 – прогнозируемые значения; 3 – фактические значения

Fig. 6. Average daily mileage dynamics forecast for electric locomotives: a) locomotive No. 102; b) locomotive No. 72; c) locomotive No. 110; 1 – initial values; 2 – predicted values; 3 – actual values

**Таблица 1.** Планирование даты наступления межремонтного пробега при среднем ремонте  
**Table 1.** Planning the onset date of the start of the interregnum run with average repair

№	Номер локомотива	Фактическая дата наступления межремонтного пробега	Планирование даты наступления межремонтного пробега			
			По действующей методике		По математической модели	
			Дата	Отклонение, сут	Дата	Отклонение, сут
1	102	19.01.2020	19.02.2020	31	31.01.2020	12
2	72	04.02.2020	20.02.2020	16	17.02.2020	13
3	110	10.02.2020	01.03.2020	20	18.02.2020	8
4	60	12.03.2020	17.04.2020	36	31.03.2020	19
5	85	21.03.2020	27.04.2020	37	31.03.2020	10
6	114	04.04.2020	09.04.2020	5	07.04.2020	3
7	143	08.05.2020	23.05.2020	15	12.05.2020	4
8	151	11.05.2020	12.06.2020	32	26.05.2020	15
9	154	21.06.2020	28.07.2020	37	03.07.2020	12
10	152	21.06.2020	02.07.2020	11	01.07.2020	10
11	144	21.06.2020	27.05.2020	25	06.06.2020	15
12	141	04.07.2020	21.07.2020	17	13.07.2020	9
13	159	05.07.2020	13.08.2020	39	31.07.2020	26
14	161	15.07.2020	02.08.2020	18	21.07.2020	6
15	165	14.08.2020	24.08.2020	10	23.08.2020	9
16	181	10.09.2020	12.09.2020	2	13.09.2020	3
17	178	23.09.2020	08.09.2020	15	12.09.2020	11
Среднее значение			–	21,53	–	10,88



**Рис. 7.** Прогноз динамики среднесуточного пробега электровозов: а) локомотив № 315; б) локомотив № 278; в) локомотив № 277; 1 – исходные значения; 2 – прогнозируемые значения; 3 – фактические значения

**Fig. 7.** Average daily mileage dynamics forecast electric locomotives: a) locomotive No. 315; b) locomotive No. 278; c) locomotive No. 277; 1 – initial values; 2 – predicted values; 3 – actual values

Таблица 2. Планирование даты наступления межремонтного пробега ТР-3

Table 2. Planning the onset date of the interregnum run TR-3

№	Номер локомотива	Фактическая дата наступления межремонтного пробега	Планирование даты наступления межремонтного пробега			
			По действующей методике		По математической модели	
			Дата	Отклонение, сут	Дата	Отклонение, сут
1	284	12.01.2020	06.01.2020	6	19.01.2020	7
2	302	27.01.2020	10.01.2020	17	07.02.2020	11
3	294	01.02.2020	04.01.2020	27	31.01.2020	1
4	293	20.02.2020	28.02.2020	9	29.02.2020	9
5	269	21.02.2020	26.02.2020	5	01.03.2020	9
6	277	23.02.2020	21.01.2020	33	13.02.2020	9
7	291	23.02.2020	09.01.2020	44	07.02.2020	16
8	334	25.02.2020	11.02.2020	14	02.03.2020	7
9	278	20.03.2020	04.04.2020	15	23.03.2020	3
10	300	26.03.2020	07.03.2020	18	07.04.2020	13
11	296	03.05.2020	13.05.2020	11	17.05.2020	15
12	349	05.05.2020	22.05.2020	18	24.05.2020	20
13	315	08.05.2020	08.04.2020	30	18.05.2020	11
14	346	11.05.2020	22.04.2020	18	21.05.2020	10
15	350	15.05.2020	06.05.2020	8	25.05.2020	11
16	347	23.05.2020	19.06.2020	28	09.06.2020	17
17	10	29.08.2020	24.07.2020	35	23.09.2020	26
Среднее значение			–	19,76	–	11,47

## Заключение

Потребность в более точном прогнозе очевидна. Сезонность наносит ущерб деятельности компании ОАО «РЖД», изучение сезонных колебаний необходимо в целях обеспечения более ритмичной работы локомотивного комплекса, нормального функционирования производственных цехов, выполнения плана сервисными и эксплуатационными предприятиями.

Разработанная математическая модель позволяет спланировать программу ремонта для каждого локомотива с учетом влияния технико-технологических, сезонных и случайных факторов в отличии от принятой методики, где расчет даты наступления ремонта оценивается по среднему значению среднесуточного пробега в текущем году.

Ввиду эффективности использования метода SSA результаты модели позволяют:

– рационально распределить ремонты, материалы, запчасти и оборудование между сервисными организациями;

– снизить расходы в следствие длительного непроизводительного простоя локомотивов в ожидании ремонта;

– спланировать эксплуатационную работу с учетом выбытия локомотивов из эксплуатируемого парка в результате ремонта и маневровую работу по подаче ремонтопригодных локомотивов в цех сервисного предприятия.

Математическая модель рассчитана на использование как при оперативном (день, декада, месяц), так и при длительном планировании (квартал, год). В условиях планово-предупредительной системы ремонта также применена к иному рельсовому или безрельсовому транспорту, для которого межремонтный период нормирован пробегом.

## Список литературы

1. Давыдов Ю.А., Мухин О.О., Заболотный В.В. Оценка влияния системных неисправностей локомотивов на среднесуточный пробег // Изв. Транс. 2021. № 3 (47). С. 31–41.
2. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница» - SSA : анализ временных рядов. СПб. : Изд-во СПбГУ, 2004. 76 с.
3. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница» - SSA : прогноз временных рядов. СПб. : Изд-во СПбГУ, 2004. 50 с.
4. Golyandina N., Korobeynikov A. Basic Singular Spectrum Analysis and Forecasting with R // Computational Statistics and Data Analysis. 2014. Vol. 71. P. 934–954. DOI: 10.1016/j.csda.2013.04.009.
5. The Sliding Singular Spectrum Analysis: a Data-Driven Non Stationary Signal Decomposition Tool / J. Harmouche, D. Fourer et al. // IEEE Transactions on Signal Processing. 2018. № 66(1). P. 251–263.

6. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package / N. Golyandina, A. Korobeynikov, A. Shlemov // Journal of Statistical Software. 2015. Vol. 67, Is. 2. P. 1–78.
7. Голяндина Н.Э., Осипов Е.В. Метод «Гусеница» -SSA для анализа временных рядов с пропусками // Гусеница : сайт. URL: <https://www.gistatgroup.com/gus/mvssa1ru.pdf> (Дата обращения: 25.12.2021).
8. Кулинич, Ю.М., Шухарев С.А. Прогнозирование стоимости электроэнергии и состояния изоляции электрооборудования // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. № 8 (3). С. 25–26.
9. Прогнозирование временного ряда на основе метода «Гусеница» -SSA / Н.Д. Поляхов, И.А. Приходько, Е.А. Воробьева, и др. // XVIII Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2015) : материалы конф. СПб., 2015. Т. 1. С. 404–407.
10. Иванова К.А., Тирских В.В. Планирование объема грузоперевозок на станциях ВСЖД методом «SSA-Гусеница» // Информатизация и виртуализация экономической и социальной жизни : материалы VII Всерос. студен. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2019. С. 230–235.
11. Иванов В.В., Осетров Е.С. Прогнозирование суточных объемов пассажирских перевозок в Московском метрополитене // Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15. № 1(213). С. 88–108.
12. Трофимова В.Ш. Экономико-математическое моделирование и прогнозирование электропотребления промышленного предприятия (на примере ОАО «ММК») // Экономика, статистика и информатика. 2010. № 4. С. 109–114.
13. Щелкалин В.Н., Тевяшев А.Д. Трендовый и декомпозиционный подходы прогнозирования процессов потребления электроэнергии // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. 2011. Т. 5. № 4(53). С. 30–37.
14. Щелкалин В.Н. Системный подход к синтезу математических моделей прогнозирования взаимосвязанных нестационарных временных рядов // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. 2015. Т. 2. № 4(74). С. 21–35.
15. Дьяконов В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах. М. : ДМК Пресс, 2011. 800 с.
16. 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. 1263 с.
17. N. Golyandina, E. Osipov. The «Caterpillar»-SSA method for analysis of time series with missing values // Journal of Statistical Planning and Inference. 2007. № 137(8). Р. 2642–2653.
18. Степанов Д.В., Голяндина Н.Э. Варианты метода «Гусеница» - SSA для прогноза многомерных временных рядов // Идентификация систем и задачи управления : тр. IV Междунар. конф. Москва, 2005. С. 1831–1848.
19. Структурный анализ и прогноз зимних осадков методом «Caterpillar» -SSA / А.А. Ташилова, Л.А. Кешева, С.Б. Балкарова и др. // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. 2013. Т. 15. № 1. С. 106–114.
20. V. Ivanov, E. Osetrov. Application of Artificial Neural Networks and Singular-Spectral Analysis in Forecasting the Daily Traffic in the Moscow Metro // EPJ Web of Conferences. Dubna, 2018. Р. 05009. DOI 10.1051/epjconf/201817305009.
21. Вохмянин С.В. Испытание алгоритма метода «гусеница-SSA» для восстановления временного ряда // Вестн. Сибир. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2010. № 2(28). С. 59–62.
22. Нормы межремонтных пробегов железнодорожного подвижного состава, эксплуатируемого на инфраструктуре : распоряжение ОАО «РЖД» от 11.08.2016 г. № 1651/р. Доступ из справ.-прав. системы «Автоматизированная система правовой информации на железнодорожном транспорте» (Дата обращения: 27.12.2021).
23. Методика расчета потребности в заводских и деповских ремонтах локомотивов ОАО «РЖД». Расчет Р1881 РР : распоряжение ОАО «РЖД» от 6.02.2019 г. № 198/р. Доступ из справ.-прав. системы «Автоматизированная система правовой информации на железнодорожном транспорте» (Дата обращения: 27.12.2021).

## References

1. Davydov Yu.A., Mukhin O.O., Zabolotnyi V.V. Otsenka vliyaniya sistemnykh neispravnostei lokomotivov na srednesutochnyy probeg [Assessment of the influence of system failures of locomotives on average day run]. *Izvestiya Transsib* [Bulletin of Transsib]. 2021, no 3(47), pp. 31–41.
2. Golyandina N.E. Metod «Gusenitsa»-SSA: analiz vremennykh ryadov [Caterpillar-SSA Method: time series analysis]. Saint Petersburg: SPbGU Publ., 2004. 76 p.
3. Golyandina N.E. Metod «Gusenitsa» -SSA: prognoz vremennykh ryadov [Caterpillar-SSA Method: Time Series Forecast]. Saint Petersburg: SPbGU Publ., 2004. 50 p.
4. N. Golyandina, A. Korobeynikov Basic Singular Spectrum Analysis and Forecasting with R. Computational Statistics and Data Analysis. Volume 71, 2014, pp. 934–954.
5. J. Harmouche, D. Fourer et al. The Sliding Singular Spectrum Analysis: a Data-Driven Non-Stationary Signal Decomposition Tool. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, no. 66(1), pp. 251–263.
6. N. Golyandina, A. Korobeynikov, A. Shlemov, K. Usevich. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package. *Journal of Statistical Software*, v.67, Issue 2, 2015, pp. 1–78.
7. Golyandina N.E., Osipov E.V. Metod «Gusenitsa» -SSA dlya analiza vremennykh ryadov s propuskami (Elektronnyi resurs) [Caterpillar-SSA method for time series analysis with gaps (Electronic resource)]. Available at: <https://www.gistatgroup.com/gus/mvssa1ru.pdf>. (Accessed December 25, 2021).
8. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A. Prognozirovaniye tendentsii razvitiya energetiki zheleznodorozhnoy transporta [Forecasting the development trend of railway energy]. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology]. 2020, no 8 (3), pp. 25 – 26.
9. Polyakhov N.D., Prikhod'ko I.A., Vorobieva E.A., Minor A.S. Prognozirovaniye vremennogo ryada na osnove metoda «Gusenitsa»-SSA [Time series forecasting based on the Caterpillar-SSA method]. *Materialy XVIII Mezhdunarodnoi konferentsii*

po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM'2015) [Proceedings of XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2015)]. Saint Petersburg, 2015, vol. 1, pp. 404–407.

10. Ivanova K.A., Tirsikh V.V. Planirovaniye ob'ema gruzoperevozok na stantsiyakh VSZHD metodom «SSA-Gusenitsa» [Planning the volume of freight traffic at the stations of the Higher Railways using the SSA-Caterpillar method]. *Materialy VII Vseso Rossiiskoi studentcheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Informatizatsiya i virtualizatsiya ekonomicheskoy i sotsial'noy zhizni»* [Proceedings of the VII All-Russian Student Scientific and Practical Conference with international participation «Informatization and virtualization of economic and social life】. Irkutsk, 2019, pp. 230–235.

11. Ivanov V.V., Osetrov E.S. Prognozirovaniye sutochnykh ob'yemov passazhirskikh perevozok v Moskovskom metropolitene [Forecasting daily volumes of passenger traffic in the Moscow Metro]. *Pis'ma v zhurnal Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra* [Letters to the journal Physics of elementary particles and the atomic nucleus]. 2018, vol. 15, no 1 (213), pp. 88–108.

12. Trofimova V.Sh. Ekonomiko-matematicheskoye modelirovaniye i prognozirovaniye elektropotrebleniya promyshlennogo predpriyatiya (na primere OAO «MMK») [Economic and mathematical modeling and forecasting of energy consumption of an industrial enterprise (on the example of OJSC MMK)]. *Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO* [Economics, statistics and computer science. Bulletin of UMO]. 2010, no. 4, pp. 109–114.

13. Shchelkalin V.N., Tevyashev A.D. Trendovy i dekompozitsionnyi podkhody prognozirovaniya protsessov potrebleniya elektroenergii [Trend and decomposition approaches to forecasting processes of electricity consumption]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii* [Eastern European Journal of Advanced Technologies]. 2011, no 4 (53), pp. 30–37.

14. Shchelkalin V.N. Sistemnyi podkhod k sintezu matematicheskikh modelei prognozirovaniya vzaimosvyazannykh nesstacionarnykh vremennykh ryadov [A systematic approach to the synthesis of mathematical forecasting models of interconnected non-stationary time series]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii* [Eastern European Journal of Advanced Technologies]. 2015, no 4 (74), pp. 21–35.

15. D'yakonov V.P. Maple 10/11/12/13/14 v matematicheskikh raschetakh [Maple 10/11/12/13/14 in mathematical calculations]. Moscow: DMK Press Publ., 2011. 800 p.

16. D'yakonov V.P. Entsiklopediya kom'yuternoi algebry. 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]. Moscow: DMK Press Publ., 2010. 1268 p.

17. N. Golyandina, E. Osipov. The «Caterpillar»-SSA method for analysis of time series with missing values. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2007, no. 137(8), pp. 2642–2653.

18. Stepanov D.V., Golyandina N.E. Varianty metoda «Gusenitsa»-SSA dlya prognoza mnogomernykh vremennykh ryadov [Variants of the Caterpillar-SSA method for forecasting multivariate time series]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy konferentsii «Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya»* [Proceedings of the IV International Conference «Identification of Systems and Control Problems】. Moscow, 2005, pp. 1831–1848.

19. Tashilova A.A., Keshova L.A., Balkarova S.B. etc. Strukturnyi analiz i prognoz zimnikh osadkov metodom «Caterpillar»-SSA [Structural analysis and forecast of winter precipitation using the Caterpillar-SSA method]. *Doklady Adygskoi (Cherkesskoi) Mezhdunarodnoi akademii nauk* [Reports of the Adyghe (Cherkess) International Academy of Sciences]. 2013, no 1, pp. 106–114.

20. V. Ivanov, E. Osetrov. Application of Artificial Neural Networks and Singular-Spectral Analysis in Forecasting the Daily Traffic in the Moscow Metro // EPJ Web of Conferences. Dubna, 2018. P. 05009. DOI 10.1051/epjconf/201817305009.

21. Vokhmyanin S.V. Ispytaniye algoritma metoda «Gusenitsa-SSA» dlya vosstanovleniya vremennogo ryada [Testing the algorithm of the «Caterpillar-SSA» method for restoring the time series]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aeroekosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev]. 2010, no 2 (28), pp. 59–62.

22. Rasporyazheniye OAO «RZHD» ot 11.08.2016 no. 1651r «Normy mezhremontnykh probegov zheleznodorozhного podvzhnogo sostava, ekspluatiruyemogo na infrastructure» [Order of JSC «Russian Railways» dated August 11, 2016, no 1651r «Standards of overhaul runs of railway rolling stock operated on the infrastructure»]. Available at: «Automated system of legal information on railway transport» (Accessed December 27, 2021).

23. Rasporyazheniye OAO «RZHD» ot 6 fevralya 2019, no 198r «Metodika rascheta potrebnosti v zavodskikh i depovskikh remontakh lokomotivov OAO «RZHD». Raschet R1881 RR» [Order of JSC «Russian Railways» dated 6.02.2019, no 198r «Methodology for calculating the need for factory and depot repairs of locomotives of JSC «Russian Railways». Calculation of R1881 RR»]. Available at: «Automated system of legal information on railway transport» (Accessed December 27, 2021).

#### Информация об авторах

**Мухин Олег Олегович**, аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: muhinoo@mail.ru

#### Information about the authors

**Oleg O. Mukhin**, Ph.D. student of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: muhinoo@mail.ru

## Выбор оптимальных видов оборудования уровня процесса и уровня подстанции цифровой тяговой подстанции

Е. Ю. Пузина✉

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

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

✉ lena-rus05@mail.ru

### Резюме

В настоящее время в ОАО «Российские железные дороги» актуальной задачей, направленной на уменьшение эксплуатационных расходов, совершенствование системы управления технологическими процессами, выбор оптимальных направлений развития, является цифровизация всех подразделений акционерного общества. В части энергообеспечения к элементам цифровой трансформации относится и организация цифровых тяговых подстанций. Реализация проектов цифровых тяговых подстанций в настоящее время только начинает осуществляться. Единичные тяговые подстанции на Горьковской и Западно-Сибирской железных дорогах оснащены оборудованием на уровне процесса, в основном речь идет об устройствах мониторинга состояния силового оборудования, оперативных цепей, высоковольтных выключателей, ограничителей перенапряжения, ячеек комплектных распределительных устройств средних классов напряжения. Продвижение ко второму и третьему уровням цифровой тяговой подстанции только начинается. Второй уровень цифровой тяговой подстанции включает в себя устройства релейной защиты и автоматики, регистрации аварийных событий и противоаварийной автоматики. Третий уровень составляют системы управления тяговой подстанцией, программно-технические комплексы и человеко-машинные интерфейсы. И в этом отношении крайне важно выработать концепцию унификации применяемого на данных уровнях оборудования и программного обеспечения. Реализация данной концепции позволит на примере отдельных тяговых подстанций отработать целесообразность применения тех или иных видов оборудования и принять к реализации оптимальные варианты оборудования. Это, в свою очередь, обеспечит в дальнейшем надежность работы цифровых тяговых подстанций и повысит безопасность перевозочного процесса.

### Ключевые слова

цифровая тяговая подстанция, тяговые трансформаторы, уровни присоединения и подстанции, системы диагностики и мониторинга

### Для цитирования

Пузина Е. Ю. Выбор оптимальных видов оборудования уровня процесса и уровня подстанции цифровой тяговой подстанции / Е. Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 133–144. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).133-144

### Информация о статье

поступила в редакцию: 28.02.2022 г.; поступила после рецензирования: 09.03.2022 г.; принята к публикации: 11.03.2022 г.

## Selection of optimal types of the process level and substation level equipment of the digital traction substation

Е. Yu. Puzina✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ lena-rus05@mail.ru

### Abstract

At present, the urgent task in the Open Joint Stock Company «Russian Railways», aimed at reducing operational expenses, improving the process control systems and choosing the optimal development directions, is the digitalization of all divisions of the joint-stock company. As far as the power supply for Russian railways is concerned, the elements of digital transformation include, among other things, the organization of digital traction substations. The implementation of digital traction substation projects is currently just beginning to be carried out. Single traction substations on the Gorky and West Siberian railways are equipped with the process level equipment, mainly the devices for monitoring the state of power equipment, operational circuits, high-voltage circuit breakers, surge arresters, cells of complete switchgears of medium voltage classes. The progress towards the second and third levels of the digital traction substation is just beginning. The second level of the digital traction substation includes relay protection and automation devices, emergency event registration and emergency automation. The third level consists of traction substation control systems, program-technical complexes and human-machine interfaces. And in this regard, it is extremely important to develop a concept for the unification of the equipment and software used at these levels. The implementa-

tion of this concept will allow, using the example of individual traction substations, to work out the feasibility of using certain types of equipment and to accept the best equipment options for implementation. This, in turn, will further ensure the reliability of the operation of digital traction substations and increase the safety of the transportation process.

### Keywords

digital traction substation, traction transformers, connection levels and substations, diagnostic and monitoring systems

### For citation

Puzina E.Yu. Vybor optimal'nykh vidov oborudovaniya urovnya protsessa i urovnya podstantsii tsifrovoi tyagovoi podstantsii [Selection of optimal types of the process level and substation level equipment of the digital traction substation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 133–144. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).133-144

### Article Info

Received: 28.02.2022; revised: 09.03.2022; accepted: 11.03.2022.

### Введение

В энергетической стратегии развития Российской Федерации до 2035 года определены основные направления развития энергетической структуры железнодорожного транспорта:

- обеспечение перевозочного процесса топливно-энергетическими ресурсами в необходимых объемах в любых ситуациях;
- совершенствование системы управления энергообеспечения открытого акционерного общества «Российские железные дороги» на основе ее цифровизации.

Внедрение данных направлений развития предполагает обеспечение энергетической структуры наиболее современными цифровыми технологиями, использование которых повысит качество и надежность управления технологическими процессами, приведет к существенному снижению эксплуатационных расходов, благоприятно отразится на безопасности перевозочного процесса.

В области энергообеспечения железнодорожного транспорта к элементам цифровизации относятся и такие объекты, как тяговые подстанции [1–4].

### Описание проблемной ситуации и постановка задачи

В настоящее время на отечественном железнодорожном транспорте нет полностью цифровизированных подстанций. Процесс их цифровизации останавливает как отсутствие полностью доработанного программного обеспечения отечественной разработки, учитывающего особенности эксплуатации именно тяговых подстанций, так и отсутствие единой концепции выбора оборудования для первого, вто-

рого и третьего уровней цифровой тяговой подстанции (ЦТП).

В работе [5] выполнен сравнительный анализ оборудования первого уровня ЦТП, предложены оптимальные версии оборудования, производимого отечественными предприятиями.

С целью формирования единого подхода к оснащению оборудованием второго и третьего уровней ЦТП [1–5] необходим обзор и анализ характеристик выпускаемого в России оборудования данных уровней.

### Выбор оборудования уровня присоединения

Уровень присоединения включает в себя не только оборудование, но и программное обеспечение, которое служит для сбора информации с объектов первого уровня и обособленных подсистем ЦТП, ее обработки и передачи на третий уровень.

К оборудованию уровня присоединения относят терминалы релейной защиты и автоматики (РЗА), устройства регистрации аварийных событий и устройства противоаварийной автоматики (ПА). Так как шкафы составляются на базе микропроцессорных терминалов, сведем их выбор в табл. 1.

Анализ информации, приведенной (табл. 1) позволяет сделать вывод, что для защиты распределительных устройств (РУ) 0,4, 10, 110 и 220 кВ тяговых подстанций подходит защита ООО «Релематика», так как терминалы этой компании отвечают всем необходимым требованиям, также количество входов для аналоговых и дискретных сигналов больше. Для защит РУ 27,5 кВ остановим выбор на терминалах ИнТер компании ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», так как данные терминалы специализированы

под напряжение 27,5 кВ. Рассмотрим подробно защиты для потенциальных распределительных устройств ЦТП.

### Защиты для распределительных устройств центральной тяговой подстанции

#### 1. РУ 220, 110 кВ.

В качестве защиты для РУ питающего напряжения ЦТП представляется оптимальным использовать централизованную цифровую РЗА 110–220 кВ производства ООО «Релематика» (рис. 1).

Данная защита представляет собой комплекс устройств, способных не только реализовывать функции основных и резервных защит всех объектов ЦТП, но и осуществлять измерение, сигнализацию и управление коммутационными аппаратами всех присоединений ее РУ.

Достоинства централизованной защиты:

- сокращаются затраты на кабельную продукцию до 70 % и эксплуатацию;
- сокращаются работы по проектирова-

нию на 25 %;

– снижается общее количество шкафов РЗА на 50%;

– сокращается время ввода в эксплуатацию и интеграцию автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП).

#### 2. РУ 27,5 кВ.

Для защиты присоединений 27,5 кВ имеет смысл выбирать терминалы ИнТер-825 производства «НИИЭФА-Энерго», которые помимо комплекса функций, указанных ранее для терминалов производства ООО «Релематика», также способны осуществлять диагностику выключателей и самодиагностику терминалов в специализированных тяговых РУ (рис. 2).

К перечню функций РЗА, которые способен выполнять терминал ИнТер-825, также относятся:

- направленная максимальная токовая защита;
- направленная защита по увеличению

**Таблица 1. Характеристики терминалов релейной защиты и автоматики**  
**Table 1. Characteristics of relay protection and automatics terminals**

Характеристики терминалов микропроцессорной защиты и противоаварийной автоматики	Производитель		
	ООО «НИИЭФА-Энерго»	ООО НПП «Экра»	ООО «Релематика»
Температурные условия, °С	(-10)–(+45)	(-5)–(+45)	(-55)–(+55)
Номинальное напряжение, кВ	27,5	35(6,10) – 750	35(0,4, 6, 10) – 750
Интерфейс	МЭК 61850	МЭК 61850	МЭК 61850
Интервал значений напряжения питания, В	176–253	88–242	88–242
Количество входов:			
Аналоговых, шт,	8	13	24
Дискретных, шт.	30	32	80
Осциллограф	+	–	+
Диагностика выключателя	+	+	+
Управление выключателем	+	+	+
Управление разъединителем	+	+	+
Дифференциальная защита по току	+	+	+
Устройство резервирования отказа выключателя	+	+	+
Максимальная токовая защита	+	+	+
Токовая защита нулевой последовательности	+	+	+
Устройство автоматического повторного включения	+	+	+
Газовая защита	–	+	+
Автоматическое регулирование напряжения силовых трансформаторов	–	+	+
Защита по минимальному напряжению	+	+	+
Автоматическая частотная разгрузка	+	+	+
Определитель места повреждения в контактной сети	+	+	+

тока за заданное время;

– защита с выдержкой времени по напряжению и току;

– направленная защита по критической скорости нарастания тока;

– блокировка многократных включений.

комплекс устройств ПА имеет модульную структуру, что дает возможность реализовывать различные модификации для конкретного проекта.

Функции ПА, выполняемые на ЦТП:

– ограничение снижения напряжения, три очереди по уровню напряжения;

– ограничение повышения напряжения;

– разгрузка при перегрузке по току;

– фиксация отключения объекта: линии силового трансформатора, выключателя присоединения;

– фиксация тяжести короткого замыкания.

## Выбор противоаварийной автоматики

В качестве ПА представляется оптимальным выбрать «Ш2400 20,5» от ООО «Релематика».

Данные шкафы представляют собой многофункциональные шкафы ПА, выполненные на основе терминала серии «TOP 300 ПА»,

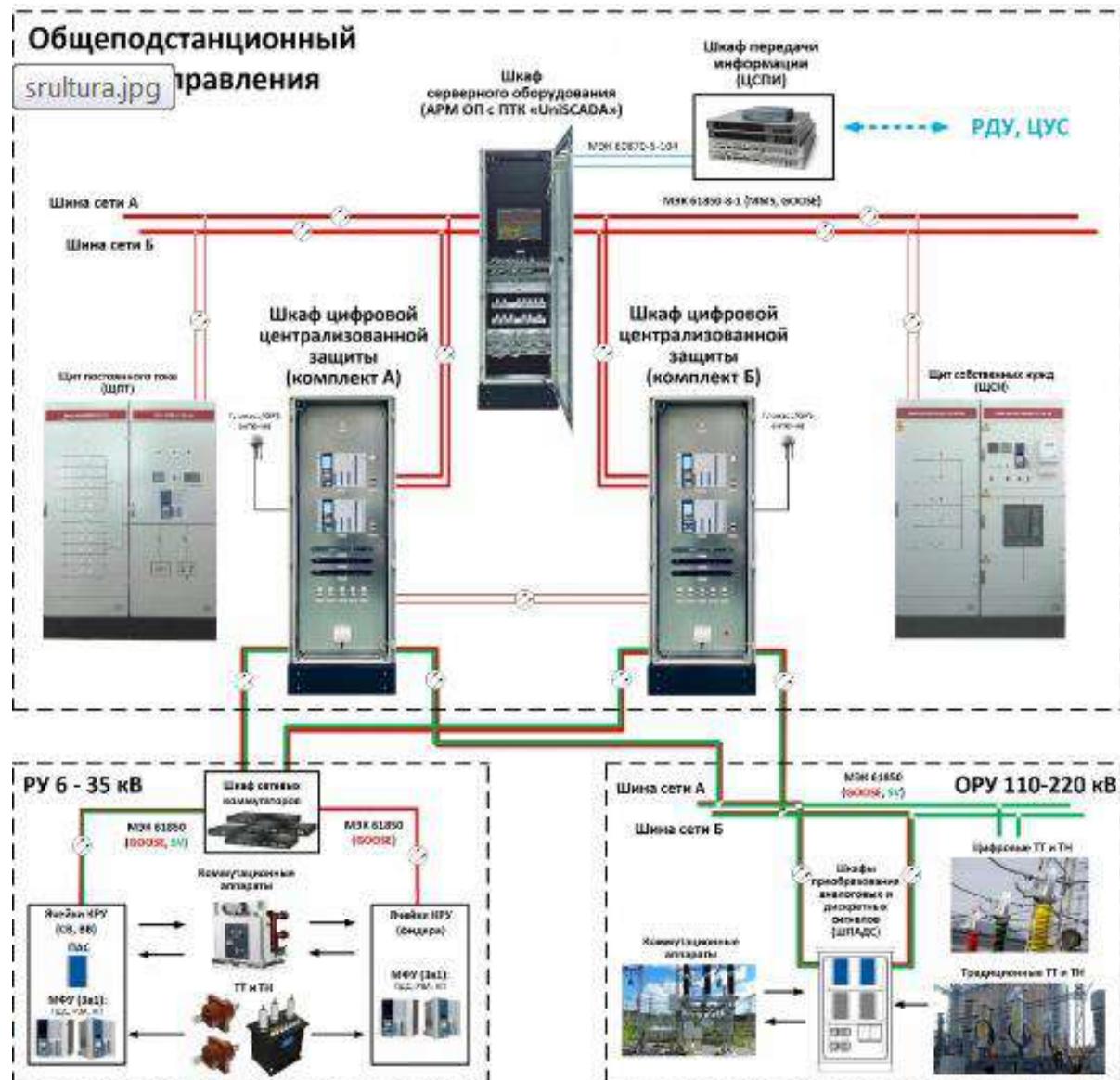


Рис. 1. Цифровая централизованная релейная защита и автоматика

Fig.1. The centralized digital relay protection and automation

## Выбор системы регистрации аварийных событий

Для регистрации аварийных событий целесообразно использовать на ЦТП устройство типа «Ш2600 03.50Х» компании «Релематика». Его основная функция – запись и хранение различных сигналов при возникновении аварийных событий.

В составе шкафа Ш2600 03.50Х находятся терминалы «TOP 300 PAC 50Х», способные регистрировать до 80 дискретных и 24 аналоговых сигналов. На базе этих терминалов можно создавать локальную сеть, связанную с сервером данных. Сервер данных соединяется с программно-техническим комплексом (ПТК) для синхронизации по времени, просмотра состояния аналоговых и дискретных входов, изменения установок, просмотра, записи и удаления осциллографм.

Терминал TOP 300 PAC 50Х осуществляет следующие основные функции:

- пуск при недопустимом изменении значений дискретных и аналоговых сигналов, симметричных составляющих, значений частоты;
- функция определения места повреждения.

## Выбор оборудования уровня подстанции

Уровень подстанции – это третий, верхний уровень управления, на котором расположены, согласно [1–5], основные системы управления подстанцией, ПТК и автоматизированное рабочее место (АРМ) персонала ЦТП. В состав оборудования уровня подстанции входят:

- сервер управления цифровой тяговой

подстанции;

- сервер управления подстанционным оборудованием (SCADA);
- сервер контроля и связи;
- сервер сбора, хранения и передачи информации;
- АРМ персонала;
- сервер точного времени;
- средства гарантированного питания.

Объединение данного оборудования в единую технологическую сеть осуществляется через сетевое оборудование, которое включает коммутаторы, сетевые шлюзы, межсетевые экраны, конвертеры протоколов.

Канал связи строится на основе технологии «Ethernet» или не уступающей в параметрах производительности, надежности и защищенности.

## Выбор основного сервера

В связи с наличием всех необходимых для ЦТП функций рекомендуется использовать серверный шкаф «Ш2800 01» компании «Релематика» (рис. 3), который предназначен для сбора, обработки, хранения и передачи информации.

Основные функции:

- сбор аналоговой и дискретной информации;
- ведение баз данных событий, трендов и действий персонала;
- синхронизация по времени компонентов АСУ ТП;
- интеграция со смежными подсистемами



Рис. 2. Терминал ИнTer  
Fig.2. InTer terminal

(АСКУЭ, видеонаблюдением, охранной и пожарной сигнализациями и т. д.);

– горячее резервирование компонентов ПТК;

– тестирование и самодиагностика компонентов ПТК;

– поддержка различных типов каналов связи (RS-485, МЭК 61850, Ethernet, беспроводные сети).

Состоит шкаф из следующего оборудования:

– серверы (STSS Flagman, Lenovo (IBM) под управлением ОС MS Windows Server 2008R2 и выше);

– промышленные коммутаторы таких производителей, как Moxa, Hirschmann, Etherwan;

– KVM (монитор, клавиатура, мышь, KVM-консоль);

– контроллер самодиагностики шкафа ОВЕН 100;

ление оборудованием одного или нескольких присоединений электрической подстанции. Соответственно, его удобно использовать на ЦТП.

Основные функции КП:

– сбор аналоговой и дискретной информации коммутационных аппаратов;

– управление коммутационными аппаратами;

– оперативные блокировки разъединителей;

– интеграция со смежными подсистемами (охранной и пожарной сигнализации и т. д.);

– возможность применения схем резервирования компонентов.

Для реализации указанных функций шкаф Ш2800 02 оснащается следующими видами оборудования:

– контроллер присоединения;

– коммутаторы таких производителей, как Moxa, Hirschmann, Etherwan;

– лампы сигнализации неисправности.

#### Выбор устройства сопряжения с объектом

В качестве устройства сопряжения с объектом (УСО) на ЦТП целесообразно использовать шкаф УСО «Ш2800 03» (рис. 4).



Рис. 3. Сервер сбора, хранения и передачи информации

Fig.3. Server for collection, storage and transfer of information

– сервер точного времени Метроном-200/300/600/900;

– источник бесперебойного питания;

– лампы сигнализации неисправности.

#### Выбор шкафа контроллеров присоединения

Шкаф контроллеров присоединения (КП) «Ш2800 02» обеспечивает мониторинг и управ-



Рис. 4. Шкаф устройства сопряжения с объектом «Ш2800 03»

Fig.4. The Object interface device box «SH2800 03»

Его основные задачи:

– сбор дискретных сигналов и сигналов телеметрии;

– передача сигналов телеконтроля;  
– обработка, временное хранение и передача информации.

Оборудование, устанавливаемое в шкафу:  
– общеподстанционный контроллер ARIS C30X (C301, C302, C303);  
– коммутаторы таких производителей, как Moxa, Hirschmann, Etherwan;  
– многофункциональные измерительные преобразователи ЭНИП-2;  
– лампы сигнализации неисправности.

#### Выбор шкафа связи

Шкаф связи «Ш2800 04» предназначен для сбора, промежуточной обработки, временного хранения и передачи технологической информации.

Шкаф связи выполняет следующие функции:

– объединение микропроцессорных устройств в единую локальную сеть Ethernet с применением соответствующих конверторов физических интерфейсов;  
– объединение в локальную сеть смежных подсистем (охранной и пожарной сигнализаций);  
– возможность применения резервирования компонентов, а также каналов с верхним уровнем;  
– объединение устройств по различным типам каналов связи (RS-485, оптика, Ethernet, беспроводные сети).

Основное оборудование, устанавливаемое в шкафу:

– коммутаторы таких производителей, как Moxa, Hirschmann, Etherwan;  
– шлюз UniSCADA на базе контроллера ARIS CS;  
– контроллер самодиагностики шкафа ОВЕН 100;  
– сетевые экраны MOXA EDR-903 или Ruggedcom RX1500;  
– лампы сигнализации неисправности.

#### Выбор устройства гарантированного питания

В качестве устройства гарантированного питания имеет смысл использовать шкаф гарантированного питания «Ш2800 05».

Основными функциями шкафа являются:

– обеспечение работы оборудования третьего уровня ЦТП в случае аварийного исчезновения напряжения;

– стабилизация напряжения;  
– фильтрация питающего напряжения;  
– защита от перегрузки и короткого замыкания;  
– самодиагностика.

Для выполнения данных функций шкаф Ш2800 05 оснащается таким оборудованием, как:

– источник бесперебойного питания таких производителей, как APC, Eaton;  
– инвертор производства Benning;  
– контроллер самодиагностики шкафа производства ОВЕН 100;  
– лампы сигнализации неисправности.

#### Технические средства охраны подстанции

Технические средства охраны ЦТП организуют комплексную автоматизированную систему управления безопасностью, обладающую возможностью мониторинга состояния объектов и их управления [6–16]. В состав этой комплексной системы входят несколько подсистем.

Подсистема *охранно-пожарной сигнализации* осуществляет быстрое информирование о случаях проникновения за ограждение или в помещения ЦТП посторонних лиц и о возникновении пожара на ЦТП. При этом она делится на охранно-пожарную сигнализацию (ОПС) и охранную сигнализацию периметра (ОСП).

Для организации ОСП используют высокочувствительный кабель, пропущенный в специальном спиралевидном металлическом барьере, смонтированном непосредственно на верхней границе ограждения ЦТП. Также к ее элементам относятся всепогодные пассивные инфракрасные извещатели, смонтированные на крыше здания ЦТП, въездных воротах.

ОПС монтируется в общеподстанционном пункте управления, в закрытых РУ, в насосной.

Подсистема *охранного телевидения* (СОТ) основана на использовании стационарных и поворотных видеокамер, видеорегистратора, коммутаторов, АРМ.

СОТ служит для наблюдения, верификации, регистрации событий, автоматического обнаружения проникновения.

С целью наблюдения за внутренней территорией ЦТП, включая контроль состояния электрооборудования, необходимо устанавливать поворотные видеокамеры.

С помощью стационарных видеокамер производится общий обзор территории ЦТП и

при необходимости выполняется приближение объектов для рассмотрения деталей. Расположение камер должно исключать непросматриваемые участки.

Видеорегистратор принимает сигналы с видеокамер и осуществляет их передачу пользователям. В АРМ персонала полученная пользователем информация может просматриваться для удобства в полноэкранном, мультиэкранном режиме или по заданной программе.

*Подсистема тревожной сигнализации и охранного оповещения* предназначена для обнаружения случаев незаконного проникновения на ЦТП и сообщения об этом в профильные службы по спутниковому каналу связи. В данной подсистеме используются стационарные и переносные тревожные кнопки, при нажатии которых срабатывает сирена для извещения персонала.

*Телекоммуникационная подсистема* служит для организации передачи данных и обмена информацией между указанными подсистемами. В ее состав входят кабели, кроссы и активное сетевое оборудование.

*Подсистема оповещения* на ЦТП и ее территории выполняет свои функции в таких случаях, как авария, пожар, стихийное бедствие,

нападение, с ее помощью осуществляется координация действий персонала ЦТП в таких случаях. Для оповещения используются рупорные громкоговорители.

### Выбор системы пожаротушения трансформаторов

Автоматическими установками пожаротушению оснащаются следующие трансформаторы с номинальным напряжением обмотки высокого напряжения (ВН):

- 500 кВ и выше;
- 220-330 кВ и выше, мощностью 200 МВА и более;
- 220 кВ и выше, мощностью 63 МВА и более;
- 10 кВ и выше, мощностью 40 МВА и более (рис. 5).

При осуществлении пожаротушения маслонаполненного силового трансформатора ставятся задачи ликвидации горения (или снижение его интенсивности) и охлаждения. Для ликвидации горения в течение 3–5 минут на трансформатор подается пленкообразующая пена низкой кратности.

На рис. 6 приведены карты орошения для оросителей «Антифайер», используемых как



Рис. 5. Система пожаротушения  
Fig.5. The firefighting system

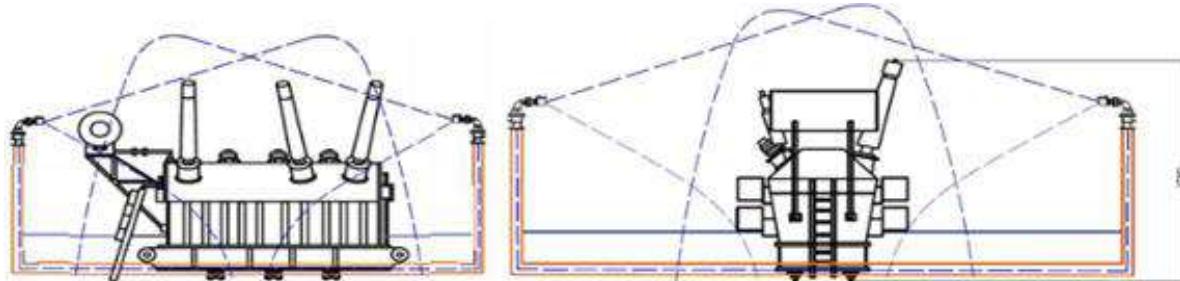


Рис. 6. Карты орошения  
Fig.6. Watering maps

для подачи пены, так и для подачи воды. Их работа организована так, что за счет соударения струй образуется объем распыляемой пены или воды низкой кратности. За счет этого быстро снижается интенсивность пожара, а в дальнейшем посредством образования на горящей поверхности трансформаторного масла изолирующей пленки горение и вовсе прекращается. Вслед за этим осуществляется подача распыленной воды для интенсивного охлаждения трансформатора.

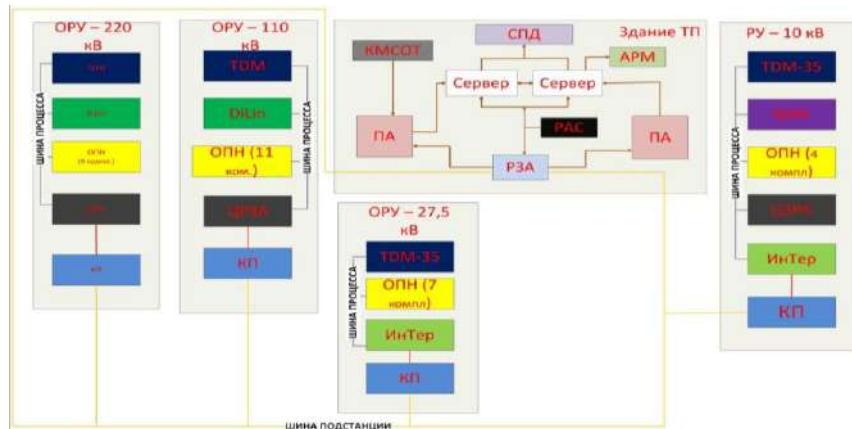
В рассмотренной системе пожаротуш-

ния применяются дренчерные оросители, универсальные водопенные насадки «Антифайер», которые разработаны и производятся в России предприятием ГК «Пожнефтехим».

## Схема информационной сети цифровой тяговой подстанции

На рис. 7 показана схема информационной связи оборудования различных уровней.

Оборудование всех РУ и всех уровней связано между собой общей интеллектуальной сетью, по которой передается информация от системы мониторинга и диагностики. Также по



**Рис. 7. Схема организации информационной сети**  
**Fig.7. Setup scheme of information network**

**Таблица 2.** Выбранное оборудование уровня присоединения  
**Table 2.** The selected connection level equipment

Номинальное напряжение установки, кВ	Назначение устройства	Наименование устройства	Производитель
220 (110)	Защита присоединений 220, 110 кВ	ЦРЗА	ООО «Релематика»
27,5	Защита присоединений 27,5 кВ	ИнТер-825	ООО «НИИЭФА-Энерго»
10	Защита присоединений 10 кВ	ИнТер-825	
10	Защита присоединений 10 кВ	ЦРЗА	ООО «Релематика»

**Таблица 3.** Общеподстанционные устройства  
**Table 3.** General substation devices

Тип оборудования	Наименование оборудования	Производитель
Оборудование уровня присоединения		
Противоаварийная автоматика	Ш2400 20,5	ООО «Релематика»
Регистрация аварийных событий	Ш2600 03.50Х	
Программное обеспечение	ПТК «МИКРА ПРО»	
Программное обеспечение	ПТК «АСУ»	
Оборудование уровня подстанции		
Общий сервер (основной и резервный)	Ш2800 01	ООО «Релематика»
Шкаф контроллеров присоединения	Ш2800 02	
Шкаф устройства сопряжения с объектом	Ш2800 03	
Шкаф связи	Ш2800 04	
Шкаф гарантированного питания	Ш2800 05	
Программное обеспечение	ПТК «Uniscada»	

данной сети передаются показания терминалов микропроцессорной защиты. После приема данных сервером, он обрабатывает полученную информацию и в последующем передает ее в АРМ и далее с помощью средств передачи данных.

Виды выбранных устройств и оборудования для установки на ЦТП в рамках второго и третьего уровней сведены в табл. 2 и 3.

## Заключение

Использование приведенного оптимального оборудования для второго и третьего

уровней ЦТП и разработанной схемы информационной сети позволит реализовать не только второй и третий уровни, но и первый, а также будет способствовать выполнению задач, поставленных в области цифровизации системы электроснабжения железнодорожного транспорта, отраженных в энергетической стратегии развития РФ до 2035 г., направленных на повышение безопасности осуществления перевозок [17–25].

## Список литературы

1. Кустов А.Н., Зацепина В.И., Бялы В. Возможные внедрения цифровых технологий в энергетический комплекс // Вестн. высш. учеб. заведений Черноземья. 2021. № 4 (66). С. 9–17.
2. СТО 56947007-29.240.10.299-2020 Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС. М. : ПАО «ФСК ЕЭС», 2020. 125 с.
3. Король Ю.Н. Концепция цифровой тяговой подстанции. М. : Трансэнерго 2020. 28 с.
4. Электротехнический завод «ВЕКТОР». Цифровая подстанция МЭК 61850 : букл. М., 2020. 22 с. URL: [https://etz-vektor.ru/storage/document/file\\_46.pdf](https://etz-vektor.ru/storage/document/file_46.pdf) (Дата обращения 20.04.2020).
5. Казаков Д.О., Пузина Е.Ю. Технические решения по цифровизации тяговых подстанций // Молодая наука Сибири. 2021. № 1 (11). С. 227–237.
6. Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. «Применение систем мониторинга на силовых трансформаторах тяговых подстанций ВСЖД // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : XXI Межвуз. науч.-практ. конф. Иркутск, 2017. С. 7–12.
7. Крюков А.В., Куцый А.П., Черепанов А.В. Применение управляемых источников реактивной мощности в системах электроснабжения железных дорог // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы конф. Иркутск, 2016. Т. 1. С. 588–593.
8. Пузина Е.Ю., Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. Системы мониторинга силовых трансформаторов тяговых подстанций. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2020. 184 с.
9. Пузина Е.Ю. Оценка остаточного ресурса тяговых трансформаторов Северного хода ВСЖД // Транспорт-2013 : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону : Изд-во РГУПС, 2013. С. 173–175.
10. Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP & HOG Features / K. Firuzi, M. Vakilian, B. Toan Phung et al. // Power Delivery IEEE Transactions. 2019. Vol. 34, №. 2. P. 542–550.
11. Dang Y., Chen W. Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493986.
12. Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer / X. Zhu, M. Chen, S. Xie et al. // IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Birmingham, 2016. P. 111–115. DOI: 10.1109/ICIRT.2016.7588719.
13. Kalathiripi H., Karmakar S. Fault analysis of oil-filled power transformers using spectroscopy techniques // IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). Manchester, 2017. P. 1–5.
14. Система мониторинга состояния изоляции / Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, А.А. Хамнаева и др. // Железнодорожный транспорт. 2021. № 3. С. 50–52.
15. Определение остаточной несущей способности металлических конструкций контактной сети / В.П. Ступицкий, И.А. Худоногов, В.А. Тихомиров и др. // Известия Транссиба. 2019. № 3 (39). С. 88–99.
16. Тихомиров В.А. Повышение эффективности процесса сушки изоляции тяговых электрических машин подвижного состава : дис. ... канд. техн. наук / Омский государственный университет путей сообщения. Иркутск, 2012. 205 с.
17. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Evaluation of short circuit currents effects on power transformers' residual service life // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2019. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743069.
18. Применение распределенного мониторинга качества электрической энергии в MICROGRID / К.В. Суслов, Н.Н. Солонина, А.С. Смирнов и др. // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2014. № 6 (89). С. 185–189.
19. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation // International Russian Automation Conference. 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.
20. Khudonogov I.A., Puzina, E.Yu., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2020. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112021.

21. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The use “Technical rigidity” indices to assess climatic factors effects on power transformers reliability // International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon. 2020. pp. 136–141.
22. Системы мониторинга и диагностические приборы для контроля технического состояния высоковольтного оборудования // Dimrus : сайт. URL: <https://dimrus.ru/manuals/dimrus2019.pdf> (Дата обращения 01.02.2022).
23. Устройство мониторинга высоковольтного выключателя АВМ-ВК. Руководство по эксплуатации. М., 2011. URL: <https://docplayer.com/87161434-Ustroystvo-monitoringa-vysokovoltogo-vykluchatelya-avm-vk.htm> (Дата обращения 01.02.2022).
24. Комплекс мониторинга систем оперативного тока серии КМСОТ «Дубна» // Техноэнергокомплект : сайт. URL: <https://thc-samara.ru/product/sistema-operativnogo-postoyannogo-toka/sistemy-raspredeleniya-postoyannogo-toka/kompleks-monitoringa-operativnogo-toka/kompleks-monitoringa-sistemy-operativnogo-toka-kmsot-m-dubna/> (Дата обращения: 01.02.2022).
25. Обеспечение безопасности сложных технических систем (технологические подходы) / С.В. Елисеев, В. Гозбенко, Н.М. Быкова и др. Деп. ВИНИТИ РАН 17.04.2008, № 328-В2008.

### References

1. Kustov A.N., Zatsepina V.I., Byaly V. Vozmozhnye vnedreniya tsifrovyykh tekhnologii v energeticheskii kompleks [Possible implementation of digital technologies in the energy complex]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya* [Conduct of higher educational institutions of the Chernozem region]. 2021, no 4(66), pp. 9-17.
2. Standart organizatsii STO 56947007- 29.240.10.299-2020 «Tsifrovaya podstantsiya. Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu TSPS» [Digital substation. Methodological guide lines for the design of the CPS. Standard of the organization 56947007- 29.240.10.299-2020]. Moscow: FSK EES Publ., 2020. 125 p.
3. Korol Yu. N. Kontsepsiya tsifrovoyi tyagovoi podstantsii [The concept of a digital traction substation]. Moscow: Transenergo Publ., 2020. 28 p.
4. Tsifrovaya podstantsiya MEK 61850 [Digital Substation IEC 61850]. Votkinsk: Elektrotekhnicheskiy zavod «VEKTOR» Publ., 2020. 22 p.
5. Kazakov D.O., Puzina E.Yu. Tekhnicheskie resheniya po tsifrovizatsii tyagovykh podstantsiy [Technical solutions for digitalization of traction substations]. *Molodaya nauka Sibiri* [The young science of Siberia]. 2021, no 1(11), pp. 227-237.
6. Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Primenie sistem monitoringa na silovykh transformatorakh tyagovykh podstantsii VSZHD [Application of monitoring systems on power transformers of traction substations of VSZHD]. *Trudy XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte»* [Proceedings of the XXI Interuniversity Scientific and Practical Conference «Innovative technologies in railway transport»]. Krasnoyarsk, 2017, pp. 7-12.
7. Kryukov A.V., Kutsyi A.P., Cherepanov A.V. Primenie upravlyayemykh istochnikov reaktivnoi moshchnosti v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [The use of controlled sources of reactive power in railroad power supply systems]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. 2016, Vol. 1, pp. 588-593.
8. Puzina E.Yu., Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Sistemy monitoringa silovykh transformatorov tyagovykh podstantsii [Monitoring systems for power transformers of traction substations]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2020. 184 p.
9. Puzina E.Yu. Otsenka ostatochnogo resursa tyagovykh transformatorov Severnogo khoda VSZHD [Evaluation of the residual service life of the Northern route traction transformers East Siberian Railroad]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport-2013»* [Proceedings of the International scientific and practical conference «Transport-2013】]. Rostov-on-Don, 2013, Vol. 3, pp. 173-175.
10. Keyvan Firuzi, Mehdi Vakilian, B. Toan Phung, Trevor R. Blackburn, "Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP & HOG Features," Power Delivery IEEE Transactions on, vol. 34, no. 2, pp. 542–550, 2019.
11. Y. Dang and W. Chen, "Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect," 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, pp. 1–4, 2018.
12. Xiaozhou Zhu, Minwu Chen, Shaofeng Xie and Jie Luo, "Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer," 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), Birmingham, pp. 111–115, 2016.
13. H. Kalathiripi and S. Karmakar, "Fault analysis of oil-filled power transformers using spectroscopy techniques," 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, pp. 1–5, 2017.
14. Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Khamnaeva A.A., Divinets M.A., Korsun A.A. Sistema monitoringa sostoyaniya izolyatsii [Insulation condition monitoring system]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport]. 2021, no 3, pp. 50-52.
15. Stupitskii V.P., Khudonogov I.A., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. Opredelenie ostatochnoi nesushchey sposobnosti metallicheskikh konstruktsii kontaktnoi seti [Determination of the residual bearing capacity of metal structures of the contact network]. *Izvestiya Transsibra* [Bulletin of Transsib]. 2019, no 3 (39), pp. 88-99.
16. Tikhomirov V.A. Povyshenie effektivnosti protsessa sushki izolyatsii tyagovykh elektricheskikh mashin podvizhnogo sostava [Improving the efficiency of the insulation drying process of traction electric vehicles of rolling stock]. Ph.D's thesis, Irkutsk, 2012, 205 p.
17. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Evaluation of short circuit currents effects on power transformers' residual service life. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 10.1109/ICIEAM.2019.8743069.
18. Suslov K.V., Solonina N.N., Smirnov A.S., Solonina Z.V. Primenie raspredelennogo monitoringa kachestva elektricheskoi energii v MICROGRID [Application of distributed monitoring of the quality of electrical energy in MICROGRID]. *Vestnik*

*Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]. 2014, no 6 (89), pp. 185-189.

19. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation. Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.

20. Khudonogov I.A., Puzina, E.Yu., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer (2020) Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. DOI:10.1109/ICIEAM48468.2020.9112021.

21. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The use «Technical rigidity» indices to assess climatic factors effects on power transformers reliability. Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020. 2020, pp. 136-141.

22. Sistemy monitoringa i diagnosticheskie pribory dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'tnogo oborudovaniya [Monitoring systems and diagnostic devices for monitoring the technical condition of high-voltage equipment]. Available at: <https://dimrus.ru/manuals/dimrus2019.pdf> (Accessed February 1, 2022).

23. Ustroistvo monitoringa vysokovol'tnogo vyklyuchatelya AVM-VK. Rukovodstvo po ekspluatatsii [AVM-VK high-voltage switch monitoring device. Operation Manual]. Available at: <https://docplayer.com/87161434-Ustroystvo-monitoringa-vysokovoltnogo-vyklyuchatelya-avm-vk.htm> (Accessed February 01, 2022).

24. Kompleks monitoringa sistem operativnogo toka serii KMSOT «Dubna» [Monitoring complex for operational current systems of the KMSOT series «Dubna»]. Available at: <https://thc-samara.ru/product/sistema-operativnogo-postoyannogo-toka/sistemy-raspredeleniya-postoyannogo-toka/kompleks-monitoringa-operativnogo-toka/kompleks-monitoringa-sistemy-operativnogo-toka-kmsot-m-dubna/> (Accessed February 1, 2022).

25. Eliseev S.V., Gozbenko V.E., Bykova N.M. etc. Obespechenie bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem (tekhnologicheskie podkhody) [Mine ensuring the safety of complex technical systems (technological approach)]. *Deponirovannaya rukopis'* [Deposited manuscript]. VINITI RAN no 328-V2008. April 17, 2008.

### Информация об авторах

**Пузина Елена Юрьевна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения; кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: lena-rus05@mail.ru

### Information about the authors

**Elena Yu. Puzina**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment «Electric Power Industry of Transport», Irkutsk State Transport University; the Subdepartment «Power Supply and Electrical Engineering», Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: lena-rus05@mail.ru

## Применение интеграла Дюамеля для анализа электромагнитных процессов в силовых цепях электровозов переменного тока

Д. А. Супрун, В. Г. Скорик✉

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

✉ skorik@festu.khv.ru

### Резюме

В статье рассмотрен способ получения аналитической зависимости отклика системы на воздействие сигнала сложной формы. В некоторых случаях специфика формы кривой воздействующего сигнала не позволяет получить искомую зависимость путем классического решения дифференциального уравнения. Отмечено, что в подобной ситуации аналитическая зависимость искомой физической величины от времени не может быть получена с помощью численных методов решения. Поэтому в заданных условиях предложено применение интеграла Дюамеля в качестве наиболее оптимального способа решения поставленной задачи. Практической областью применения данного метода является расчет электромагнитных переходных процессов в цепях силовой электроники. В качестве примера в статье рассмотрено применение интеграла Дюамеля при математическом моделировании быстропротекающих процессов в электрических цепях магистральных электровозов однофазно-постоянного тока. Процессы переключения силовых тиристорных ключей приводят к резкому изменению основной электрической схемы протекания тока. Для изучения характера изменения тока в цепях тяговых двигателей выполнен вывод его аналитической зависимости от времени. При математическом моделировании вычисления проводились для условий, определенных штатным алгоритмом управления в тяговом режиме работы электровоза, без учета особенностей многоконтурной коммутации тиристорных плеч. Сравнительный анализ результатов моделирования и результатов измерений при реальных условиях эксплуатации электровоза показал адекватность созданной математической модели реальным процессам, протекающим в силовых цепях подвижного состава. Полученные результаты расчета доказывают возможность использования предложенного подхода для анализа электромагнитных переходных процессов в электромеханических системах.

### Ключевые слова

Интеграл Дюамеля, ток в цепи двигателя, электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, условия Дирихле, тяговый двигатель последовательного возбуждения

### Для цитирования

Супрун Д. А. Применение интеграла Дюамеля для анализа электромагнитных процессов в силовых цепях электровозов переменного тока / Д. А. Супрун, В. Г. Скорик // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 145–152. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).145-152

### Информация о статье

поступила в редакцию: 21.03.2022 г.; поступила после рецензирования: 24.03.2022 г.; принята к публикации: 25.03.2022 г.

## Using the Duhamel Integral to analyze electromagnetic processes in the power circuits of AC electric locomotives

D. A. Suprun, V. G. Skorik✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ skorik@festu.khv.ru

### Abstract

The article considers a method for obtaining an analytical dependence of the system response to the impact of a complex waveform signal. In some cases, the specificity of the shape of the acting signal curve does not allow obtaining the desired dependence by the classical solution of a differential equation. It is noted that in such a situation, finding the analytical dependence of the desired physical quantity on time rules out the possibility of using numerical solutions. Therefore, under given conditions, the use of the Duhamel integral is proposed as the most optimal way to solve the problem. The practical area of application of this method is the calculation of electromagnetic transients in power electronics circuits. As an example, the article considers the use of the Duhamel integral in mathematical modeling of fast processes in the electrical circuits of single-phase AC main electric locomotives. The switching processes of power thyristor switches lead to an abrupt change in the main electrical circuit of the current flow. To study the nature of the change in the circuits current of traction motors, its analytical dependence on time was derived. In mathematical modeling, the calculations were carried out for the conditions determined by the standard control algorithm in the traction mode of the electric locomotive, without taking into account the features of multi-circuit switching of thyristor arms. A comparative analysis of the simulation and measurement results under real operating conditions of an electric locomotive showed the adequacy of the created mathematical model to real processes occurring in the power circuits of the rolling stock. The obtained results of the calculation prove the possibility of using the proposed approach for the analysis of electromagnetic transients in electromechanical systems.

**Keywords**

Duhamel integral, current in the motor circuit, electric locomotive of alternating current, reversible converter, Dirichlet conditions, traction motor of sequential excitation

**For citation**

Suprun D. A., Skorik V. G. Primenenie integrala Dyuamelya dlya analiza elektromagnitnykh protsessov v silovykh tsepyakh elektrovozov peremennogo toka [Using the Duhamel integral to analyze electromagnetic processes in the power circuits of AC electric locomotives]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 145–152. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).145-152

**Article Info**

Received: 21.03.2022; revised: 24.03.2022; accepted: 25.03.2022.

**Введение**

При решении практических задач нередко возникает необходимость получения аналитического выражения функции, описывающей исследуемый физический процесс. Однако, для сложных функций решение составленных интегрально-дифференциальных уравнений невозможно ввиду наличия в этих функциях неустойчивых точек разрыва.

Сама задача, нацеленная на получение аналитической зависимости, не может быть решена с использованием численных методов или имитационного моделирования. В таком случае альтернативным способом получения желаемого результата является применение метода интеграла Дюамеля [1–7]. В основу метода положен интеграл особого вида, позволяющий рассчитать отклик системы на изменяющееся во времени сложное входное воздействие.

Путем аппроксимации любое сложное воздействие можно представить в виде единичных ступенчатых функций, сдвинутых относительно друг друга во времени. При этом результирующая реакция системы на такие воздействия может быть определена исходя из принципа наложения. Применение такого принципа для расчета переходных процессов в электрических цепях позволяет определить конечную функцию тока как сумму токов, протекающих под воздействием составляющих входного напряжения [8–12].

В зависимости от удобства и простоты вычисления подынтегральных выражений может использоваться одна из четырех форм классической записи данного интеграла [4].

### Адаптация метода интеграла Дюамеля для определения тока в цепи тяговых двигателей магистрального электровоза

Одной из подобных задач является анализ электромагнитных переходных процессов в

устройствах силовой и информационной электроники. Причиной тому служит быстрота процессов коммутации в цепях, содержащих полупроводниковые безынерционные элементы.

Электровозы переменного тока являются довольно значительным по мощности (до 10 МВт на один электровоз) потребителем электроэнергии, содержащим преобразователи, построенные на электронной элементной базе [13]. В состав силовой схемы большинства современных электровозов входят полупроводниковые тиристорные выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), позволяющие при подключении локомотива к контактной сети переменного тока 25 кВ после выпрямления напряжения обеспечить питание тяговых электрических машин постоянного тока. При этом за счет применения в составе преобразователей тиристоров или транзисторов обеспечивается возможность регулирования силы тяги двигателей путем изменения среднего значения напряжения на их выводах. Конструктивно ВИП представляет собой схему, состоящую из нескольких параллельно соединенных мостовых однофазных выпрямителей, присоединенным к выводам секционированной вторичной обмотке трансформатора электровоза. Штатный алгоритм управления преобразователями электровозов, применяемых в настоящее время, предусматривает четырехзонное регулирование напряжения на тяговых двигателях по зонно-фазовому принципу [14–17]. Зонное регулирование обеспечивается включением в работу различных секций вторичной обмотки трансформатора в пределах всего полупериода сетевого напряжения. Фазовая составляющая регулирования реализуется путем подключения с помощью тиристоров дополнительной секции вторичной обмотки в различные моменты времени в зависимости от положения рукоятки контроллера машиниста.

Подключение отдельных секций обмоток трансформатора вызывает практически скачкообразное повышение напряжения в цепи выпрямленного тока, и напряжение может быть аналитически задано кусочно-линейной функцией. В то же время, с учетом наличия в них активных и реактивных элементов, выпрямленный ток является откликом системы на воздействие сложной функции.

На основании вышеизложенного в качестве примера использования интеграла Дюамеля рассмотрена кривая напряжения на выводах ВИП электровоза переменного тока [18] (рис. 1).

Данная кривая в моменты коммутации тиристорных плеч обладает точками разрыва первого рода. Следовательно, для того чтобы получить аналитическую зависимость функции выпрямленного тока от времени, применение классического решения дифференциального уравнения невозможно, ввиду невыполнения условий Дирихле:

$$u_d = L_{\text{экв}} \frac{di_d}{dt} + R_{\text{экв}} i_d + e_a(i_d)$$

где  $R_{\text{экв}}$  – суммарная величина активного сопротивления контура протекания тока;  $L_{\text{экв}}$  – приведенная величина индуктивности этого контура;

$e_a(i_d)$  – реакция якоря тягового двигателя.

Следует заметить, что в представленном примере не учитывается длительность коммутационных процессов, так как на результат интегрирования эти процессы оказывают незначительное влияние. Однако учет особенностей коммутации возможен с применением интеграла Дюамеля аналогичным образом, путем добавления в кривую выпрямленного напряжения дополнительных промежуточных интервалов.

В общем виде функция тока на расчетном интервале времени имеет следующий вид:

$$i_k(t) = i_{k-1}(t_{k-1}) + \Delta U_k \cdot g(t - t_{k-1}) + \int_{t_{k-1}}^t \frac{du_k(\tau)}{d\tau} \cdot g(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

где  $i_{k-1}$  – функция тока на предшествующем участке;  $\Delta U_k$  – скачок напряжения в начале расчетного интервала;  $g(t - t_{k-1})$  – функция переходной проводимости на предыдущем участке;  $u_k(\tau)$  – функция напряжения  $u_k(t)$  на диапазоне  $\tau \in [t_{k-1}; t]$ ;  $g(t - \tau)$  – функция переходной проводимости на диапазоне  $\tau \in [t_{k-1}; t]$ .

Выражение (1) содержит три составляющие:

–  $i_{k-1}(t_{k-1})$ , определяющая значение иско-

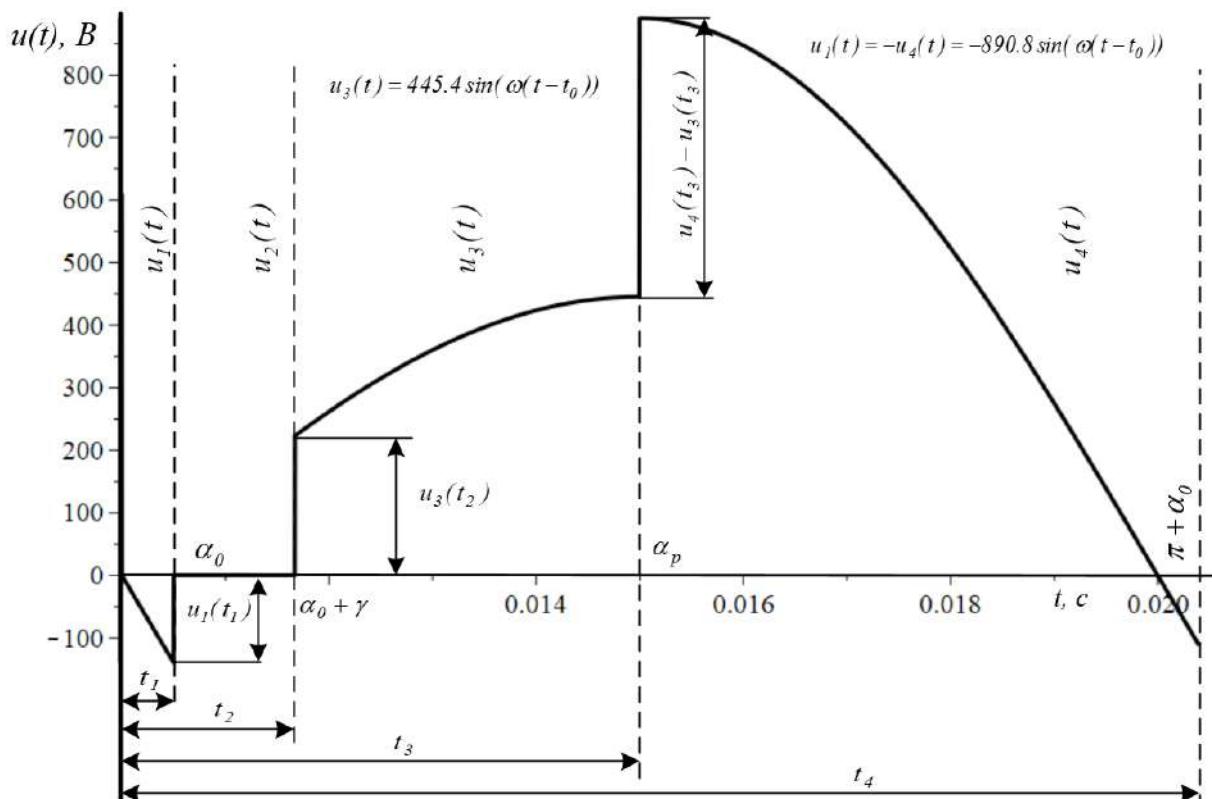


Рис. 1. Расчетная форма полупериода выпрямленного напряжения  
Fig. 1. The calculated half-period of the rectified voltage

мой функции в конце предшествующего временного интервала  $t_{k-1}$ ;

$-\Delta U_k g(t - t_{k-1})$ , определяющая переходную функцию в точке разрыва первого рода;

$$-\int_{t_{k-1}}^t \frac{du_k(\tau)}{d\tau} \cdot g(t - \tau) d\tau, \text{ определяющая за-}$$

висимость функции тока от функции напряжения на рассматриваемом интервале времени.

В данном выражении задействованы две переменных времени. Это сделано для того, чтобы разделить переменную  $(\tau)$ , по которой производится интегрирование, и переменную  $(t)$ , определяющую функциональную зависимость величины тока на заданном интервале.

Кроме того, для выполнения необходимых вычислений на каждом участке определяется переходная функция проводимости контура протекания тока. Переходная проводимость является откликом электрической системы на ступенчатый единичный входной сигнал напряжения. Общий вид функции переходной проводимости представляет собой выражение:

$$g(t) = \frac{1}{R_{\text{экв}}} (1 - e^{-p \cdot t}), \quad (2)$$

где  $p$  – постоянная затухания, которая рассчитывается исходя из суммарной величины активного сопротивления  $R_{\text{экв}}$  электрического контура протекания тока и приведенной величины индуктивности  $L_{\text{экв}}$  этого контура.

При определении аналитических выражений в данном случае наиболее трудоемким является определение величины реакции якоря тяговых двигателей электровоза. Однако, учитывая реактивный характер наводимой в двигателе противо-ЭДС, ее возможно учесть в виде нелинейной эквивалентной индуктивности. Данное эквивалентирование выполняется для установившегося режима работы двигателя постоянного тока, т. е. при неизменной частоте вращения якоря. Поскольку механическая составляющая привода обладает высокой инерционностью по сравнению с электромагнитными процессами, то корректное преобразование реакции якоря в эквивалентную индуктивность также выполняется и для кратковременных переходных режимов.

Изложенные условия с заменой противо-ЭДС линейной индуктивностью является частным случаем [19], однако, для облегчения восприятия информации такое упрощение оправдано.

Порядок подготовки задания на расчет для определения аналитического выражения функции выпрямленного тока с использованием метода интеграла Дюамеля далее рассмотрен более подробно. Имея дело с кривой достаточно сложной формы, наиболее рационально выполнять вычисления составляющих конечного уравнения пошагово. Формирование задания можно представить в виде нескольких этапов:

1. Определение переходных функций проводимости контура протекания выпрямленного тока на каждом интервале:

$$g(t - t_0) = \frac{1}{R_{\text{экв}}} (1 - e^{-p \cdot (t - t_0)}); \quad (3)$$

$$g(t - t_1) = \frac{1}{R_{\text{экв}}} (1 - e^{-p \cdot (t - t_1)}); \quad (4)$$

$$g(t - t_2) = \frac{1}{R_{\text{экв}}} (1 - e^{-p \cdot (t - t_2)}); \quad (5)$$

$$g(t - t_3) = \frac{1}{R_{\text{экв}}} (1 - e^{-p \cdot (t - t_3)}); \quad (6)$$

$$g(t - t_4) = \frac{1}{R_{\text{экв}}} (1 - e^{-p \cdot (t - t_4)}). \quad (7)$$

2. Нахождение производной функции напряжения на каждом интервале времени:

$$\frac{du_1(t)}{dt} = -U_{2m} \cdot \omega \cdot \cos(\omega(t - t_0)); \quad (8)$$

$$\frac{du_2(t)}{dt} = 0; \quad (9)$$

$$\frac{du_3(t)}{dt} = U_{1m} \cdot \omega \cdot \cos(\omega(t - t_0)); \quad (10)$$

$$\frac{du_4(t)}{dt} = U_{2m} \cdot \omega \cdot \cos(\omega(t - t_0)). \quad (11)$$

3. Определение расчетных значений функции напряжения в точках разрыва:

$$u_1(t_1) = -U_{2m} \sin(\omega(t_1 - t_0)); \quad (12)$$

$$u_3(t_2) = U_{1m} \sin(\omega(t_2 - t_0)); \quad (13)$$

$$u_3(t_3) = U_{1m} \sin(\omega(t_3 - t_0)); \quad (14)$$

$$u_4(t_3) = U_{2m} \sin(\omega(t_3 - t_0)); \quad (15)$$

$$u_4(t_4) = U_{2m} \sin(\omega(t_4 - t_0)); \quad (16)$$

Выполнение промежуточных расчетов, описанных ранее, не является обязательным условием для получения результата. Окончательный расчет может быть выполнен в виде единой зависимости, однако такой подход повышает вероятность возникновения ошибки при подготовке расчетного задания.

С учетом подстановки представленных выше промежуточных результатов, функция тока на каждом временном интервале имеет вид:

$$i_1(t) = u(0) \cdot g(t) + (0 - u(0))g(t - t_0) + \int_0^t \frac{du_1(\tau)}{d\tau}(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau; \quad (17)$$

$$i_2(t) = i_2(t_2) = i_1(t_1) + (0 - u_1(t_1)) \cdot g(t - t_1); \quad (18)$$

$$i_3(t) = i_2(t_2) + (u_3(t_2) - 0) \cdot g(t - t_2) + \int_{t_2}^t \frac{du_3(\tau)}{d\tau}(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau; \quad (19)$$

$$i_4(t) = i_3(t_3) + (u_4(t_3) - u_3(t_3)) \cdot g(t - t_3) + \int_{t_3}^t \frac{du_4(\tau)}{d\tau}(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau. \quad (20)$$

Функция  $u(0)$  в формуле (17) представляет собой постоянное напряжение, эмпирически подобранные таким образом, чтобы исключить переходный процесс на начальном интервале расчета.

Для наглядного отображения результатов использования данного метода, рассмотрена функция тока в цепях двигателей электровоза при действии выпрямленного напряжения (см. рис. 1). Уровень и форма кривой напряжения на двигателях соответствует второй зоне регулирования с углом фазового регулирования  $\alpha_p = 90^\circ$  [18].

В виде кусочно-заданной функции зависимость выпрямленного напряжения от време-

ни будет иметь вид:

$$u(t) = \begin{cases} u_1(t) = -U_{2m} \sin(\omega(t - t_0)) & 0 < \omega t < \alpha_0 \\ u_2(t) = 0 & \alpha_0 \leq \omega t < \alpha_0 + \gamma \\ u_3(t) = U_{1m} \sin(\omega(t - t_0)) & \alpha_0 + \gamma \leq \omega t < \alpha_p \\ u_4(t) = U_{2m} \sin(\omega(t - t_0)) & \alpha_p \leq \omega t < \pi + \alpha_0 \end{cases}$$

После выполнения всех вычислений по формулам (1)–(20), получены функции тока для каждого расчетного интервала (рис. 2).

Каждый закон изменения тока имеет корректную форму на своем расчетном интервале времени, и применение его на прочих участках приведет к неверному результату моделирования.

Для проверки адекватности моделирования электромагнитных процессов с помощью применения метода интеграла Дюамеля было выполнено сравнение полученных аналитически результатов с реальными кривыми, записанными в ходе опытных испытаний электровоза ВЛ80Р на участке Дальневосточной железной дороги [20, 21]. Сравнение выполнялось для работы электровоза на второй зоне регулирования напряжения при  $\alpha_p = 91^\circ$  и прочих равных условиях.

При определении адекватности применялся гармонический анализ представленных кривых в диапазоне от 0 до 40 гармоники, а также оценивался интегрированный показатель

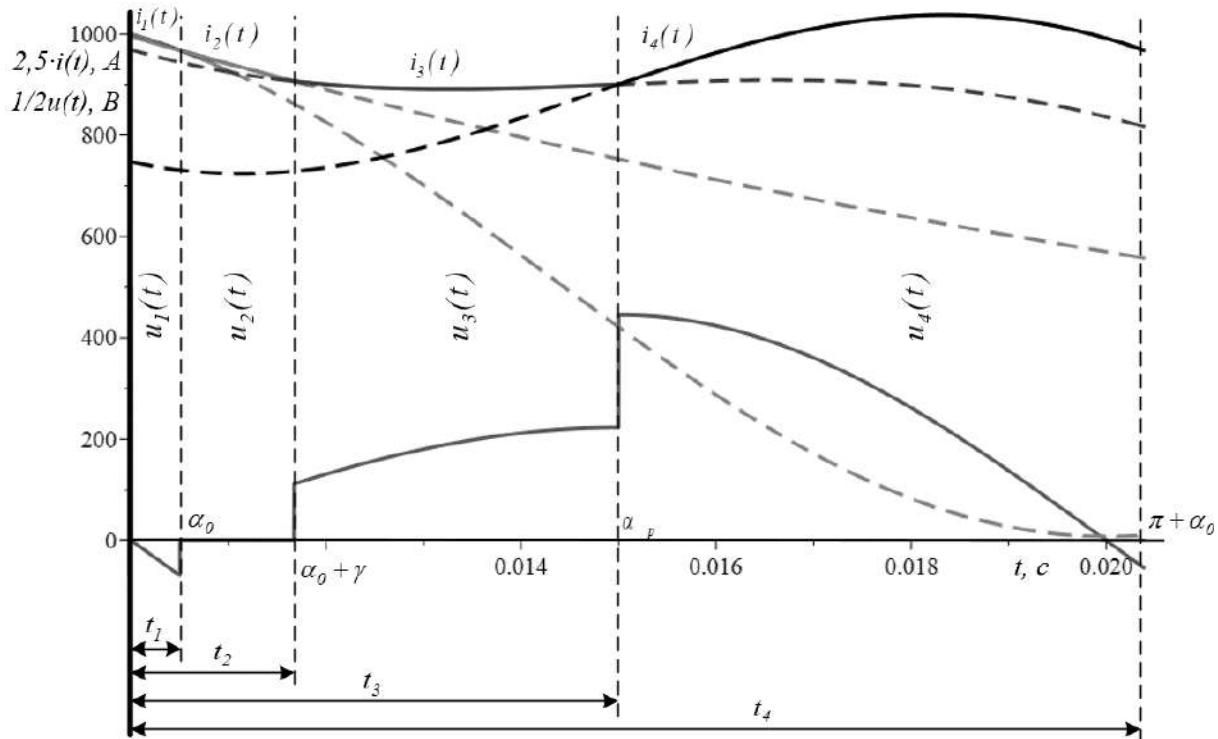


Рис. 2. Результат расчета кусочно-заданной функции тока на полупериоде напряжения  
Fig. 2. The result of calculating the piecewise-specified stream function on the voltage half-period

относительной погрешности мгновенных значений напряжения и тока в различные моменты времени.

Сравнение форм кривых выпрямленного тока  $i_{изм}(t)$  и  $i_{расч}(t)$  (рис. 3), проведенный анализ их гармонических составов показали хорошую сходимость результатов моделирования с реальными процессами. Погрешность по мгновенным значениям тока и по уровню отдельных гармоник тока не превышает 4%, что является допустимым. Анализ кривых тока и напряжения (см. рис.3) позволяет сказать, что наибольшая погрешность в кривых напряжения обусловлена неучетом длительности фазовой коммутации тиристоров преобразователя (момент времени, соответствующий  $\alpha_p$ ). Значительная индуктивность цепи выпрямленного тока способствует тому, что во время фазовой коммутации выпрямленный ток практически не меняет характера своей динамики, поэтому влияние неучета фазовой коммутации не приводит к значительному увеличению погрешности в токе.

Сравнительный анализ результатов моделирования с экспериментальными кривыми показал, что предлагаемый подход выполнения моделирования с помощью интеграла Дюамеля можно применять как способ анализа электромагнитных процессов в цепях выпрямленного

тока электровозов.

### Заключение

Оценивая возможность использования метода интеграла Дюамеля для анализа электромагнитных процессов, стоит подчеркнуть его универсальность, позволяющую, вне зависимости от сложности исходной функции, осуществлять вычисление отклика системы. Несмотря на высокие затраты времени на подготовку расчётного задания, метод является перспективным при необходимости определения влияния отдельных факторов на конечную форму токов и напряжений в силовых и измерительных электрических цепях [22].

Негативные аспекты использования данного метода, определяемые сложностью расчетов, могут быть скомпенсированы использованием программных пакетов компьютерной алгебры. Учитывая системность формирования расчетного задания, его подготовка для периодических функций упрощается применением циклических расчетов.

Функциональные зависимости, рассчитанные при использовании рассматриваемого метода, позволяют математически исследовать сложные электромагнитные процессы непрерывно во времени, тем самым расширяя возможности анализа.

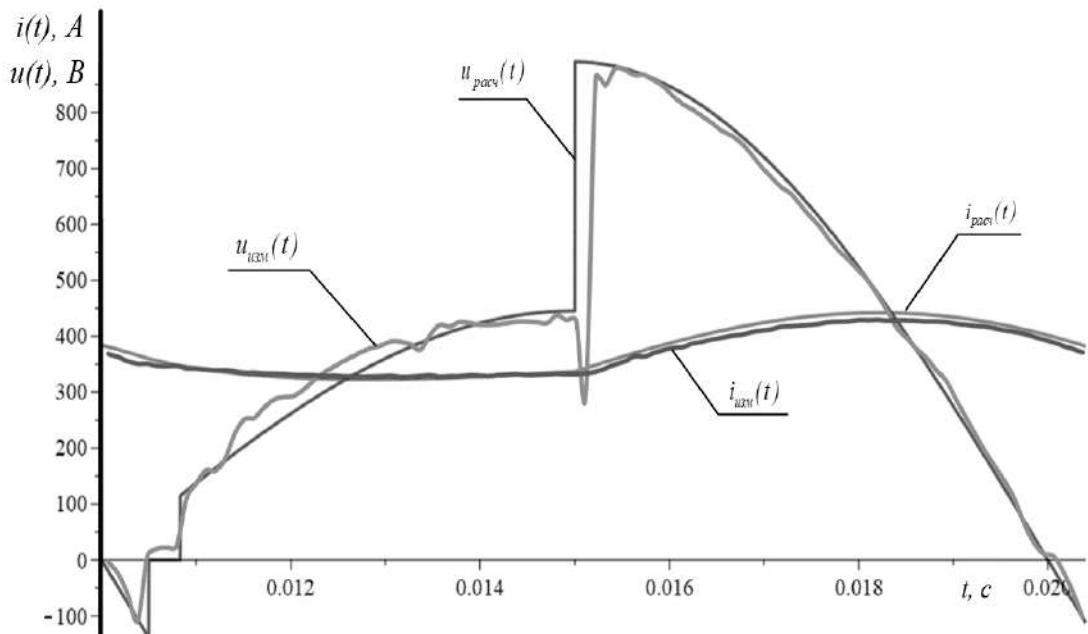


Рис. 3. Графическое сопоставление измеренных и расчетных мгновенных значений напряжения и тока в контуре тяговых двигателей

Fig. 3. Graphical comparison of measured and calculated instantaneous values of voltage and current in the traction motor circuit

**Список литературы**

1. Арутюнян Т.Р., Некрасов С.А. Двусторонние методы интегрирования жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений на основе интеграла Дюамеля // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 64–73.
2. Коган И.Л. Метод интеграла Дюамеля для обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами с точки зрения теории обобщенных функций // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физико-математические науки. 2010. № 1 (20). С. 37–45.
3. Umarov S. On fractional Duhamel's principle and its applications // Differential Equations 2012. № 252. P. 5217–5234.
4. On theoretical and practical aspects of Duhamel's integral / M. Różański, B. Sikora, A. Smuda et. al. // Archives of Control Sciences. 2021. Vol. 31(LXVII), № 4. P. 815–847.
5. Grossman Eli A. Actuarial note on Duhamel's Integral // Journal of the Staple Inn Actuarial Society. 1954. Vol. 12, Is. 4. P. 232–242.
6. Artyushin A.N. Duhamel's method in inverse problems for the wave equation I // Siberian Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018. Vol. 18, Is. 2. P. 30–46.
7. Лонших П.А., Елисеев С.В. Определение реакции механической системы на внешнее воздействие с помощью интеграла Дюамеля и эквивалентной передаточной функции // Техника и технология геологоразведочных работ в Восточной Сибири. Иркутск, 1972. С. 130–138.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. М. : Гардарики, 1999. 638 с.
9. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. М. : Вышш. шк., 1990. 400 с.
10. Боев В.М. Расчет переходных процессов в электрических цепях с «некорректными» начальными условиями с помощью интеграла Дюамеля и разрывных функций // Электротехника и электромеханика. 2018. № 4. С. 40–44. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.4.07.
11. Исаков Д.А. Расчет переходного процесса с помощью интеграла Дюамеля // Современная наука: теоретический и практический взгляд : материалы Междунар. конф. Уфа : Азтерна, 2016. Т. 3. С. 39–42.
12. Букреев Н.В. Расчет переходных процессов в электрических цепях с использованием интеграла Дюамеля // Проблемы естествознания: история и современность : материалы Всерос. конф. Ставрополь : Секвойя, 2018. С. 34–38.
13. Большая энциклопедия транспорта. Т.4. Железнодорожный транспорт. М. : Большая Российская энциклопедия, 2003. 1039 с.
14. Власьевский С.В. Математическое моделирование процессов коммутации в выпрямительно-инверторных преобразователях электровозов однофазно-постоянного тока. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2001. 138 с.
15. Кулинич Ю.М., Шухарев С.А. Использование экстремального регулятора как средства повышения коэффициента мощности тиристорного преобразователя // Изв. Трансиба. 2016. № 2 (26). С. 91–100.
16. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. М. : Транспорт, 1980. 470 с.
17. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М. : Транспорт, 1988. 312 с.
18. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) «Ермак». Руководство по эксплуатации. ИДМБ.661142.009РЭ. Ново-черкасск : Изд-во НЭВЗ, 2004.
19. Находкин М.Д. Проектирование тяговых электрических машин. М. : Транспорт, 1976. 624 с.
20. Повышение коэффициента мощности выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения / С.В. Власьевский, В.Г. Скорик, Е.В. Буняева и др. // Электроника и электрооборудование транспорта. 2011. № 1. С. 2–5.
21. Власьевский С.В., Скорик В.Г. Влияние работы оборудования электровозов переменного тока на качество электроэнергии в тяговой сети железных дорог. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2010. 103 с.
22. Система определения повреждений в силовом преобразователе электровоза переменного тока в режиме тяги / С.В. Власьевский, В.Г. Скорик, Д.А. Супрун и др. // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2020. № 5 (45). С. 71–77.

**References**

1. Arutyunyan T.R., Nekrasov S.A. Dvustoronne metody integriruvaniya zhestkikh sistem obyknovennykh differentials'nykh uravnenii na osnove integrala Dyuamelya [Bilateral methods for integrating stiff systems of ordinary differential equations based on the Duhamel integral]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [Science-intensive technologies in space exploration of the Earth]. 2018, Vol. 10, no 3, pp. 64-73.
2. Kogan I.L. Metod integrala Dyuamelya dlya obyknovennykh differentials'nykh uravnenii s postoyannymi koefitsientami s tochki zreniya teorii obobschonykh funktsii [The Duhamel integral method for ordinary differential equations with constant coefficients from the point of view of the theory of generalized functions]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko – matematicheskie nauki* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Physical and mathematical sciences]. 2010, no 1 (20), pp. 37-45.
3. Umarov S. On fractional Duhamel's principle and its applications // Differential Equations 2012. № 252. P. 5217–5234.
4. M. Różański, B. Sikora, A. Smuda, R. Witula On theoretical and practical aspects of Duhamel's integral Archives of Control Sciences Volume 31(LXVII), 2021 No. 4, pages 815–847.
5. Grossman Eli A. Actuarial note on Duhamel's Integral // Journal of the Staple Inn Actuarial Society. 1954. Vol. 12, Is. 4. P. 232–242.

6. Artyushin A.N. Duhamel's method in inverse problems for the wave equation I // Siberian Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018. Vol. 18, Is. 2. P. 30–46.
7. Lontsikh P.A., Eliseev S.V. Opredelenie reaktsii mekhanicheskoi sistemy na vneshnee vozdeistvie s pomoshch'yu integrala Dyuamelya i ekvivalentnoi peredatochnoi funktsii [Determination of the response of a mechanical system to external influences using the Duhamel integral and the equivalent transfer function]. *V sbornike «Tekhnika i tekhnologiya geologorazvedochnykh rabot v Vostochnoy Sibiri»* [Proceedings «Technique and technology of exploration work in Eastern Siberia】. Irkutsk, 1972, pp. 130–138.
8. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: Elektricheskie tsepi [Theoretical foundations of electrical engineering: Electric circuits]. Moscow: Gardariki Publ., 1999. 638 p.
9. Matkhanov P.N. Osnovy analiza elektricheskikh tsepej. Lineinye tsepi [Fundamentals of the analysis of electrical circuits. Linear chains]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1990. 400 p.
10. Boev V.M. Raschet perekhodnykh protsessov v elektricheskikh tsepyakh s «nekorrektnymi» nachal'nymi usloviyami s pomoshch'yu integrala Dyuamelya i razryvnykh funktsii [Calculation of transient processes in electrical circuits with «incorrect» initial conditions using the Duhamel integral and discontinuous functions]. *Elektrotehnika i elektromekhanika* [Electrical engineering and electromechanics]. 2018, no 4, pp. 40–44. DOI: 10.20998 / 2074-272X.2018.4.07.
11. Isakov D.A. Raschet perekhodnogo protsessa s pomoshch'yu integrala Dyuamelya [Calculation of the transition process using the Duhamel integral]. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii «Sovremennaya nauka: teoreticheskii i prakticheskii vzglyad» (v 4-kh chastyakh)* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Modern science: theoretical and practical view» (in 4 parts)], Ufa, 2016, vol. 3, pp. 39–42.
12. Bukreev N.V. Raschyt perekhodnykh protsessov v elektricheskikh tsepyakh s ispol'zovaniem integrala Dyuamelya [Calculation of transient processes in electrical circuits using the Duhamel integral]. *Materialy Vserossiyskoi konferentsii «Problemy estestvoznaniya: istoriya i sovremennost»* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference «Problems of natural sciences: history and modernity»], Stavropol', 2018, pp. 34–38.
13. Bol'shaya entsiklopediya transporta: v 8 t. T.4. Zheleznodorozhny transport [Great encyclopedia of transport: in 8 volumes. V.4. Railway transport]. Moscow: Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya, 2003. 1039 p.
14. Vlas'evskii S.V. Matematicheskoe modelirovaniye protsessov kommutatsii v vypryamitel'no-invertornykh preobrazovatelyakh elektrovozov odnofazno-postoyannogo toka [Mathematical modeling of switching processes in rectifier-inverter converters of single-phase-dc electric locomotives]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2001. 138 p.
15. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A. Ispol'zovanie ekstremal'nogo reguljatora kak sredstva povysheniya koefitsienta moshchnosti tiristornogo preobrazovatelya [Using an extreme controller as a means of increasing the power factor of a thyristor converter]. *Izvestiya Transsib* [Bulletin of Transsib]. 2016, no 2 (26), pp. 91–100.
16. Tikhmenev B.N., Trakhtman L.M. Podvizhnaya sostav elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Rolling stock of electrified railways. Theory of electrical equipment operation. Electrical circuits and devices]. Moscow: Transport Publ., 1980. 470 p.
17. Tikhmenev B.N., Kuchumov V.A. Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [Alternating current electric locomotives with thyristor converters]. Moscow: Transport Publ., 1988. 312 p.
18. Elektrovoz magistral'nyi 2EHS5K (3EHS5K) «Ermak». Rukovodstvo po ekspluatatsii. IDMB.661142.009REH (v 8 ch) [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K) «Ermak». Manual. IDMB.661142.009RE (in 8 parts)]. Novocherkassk: NEVZ Publ., 2004.
19. Nakhodkin M.D. Proektirovaniye tyagovykh elektricheskikh mashin [Design of traction electric machines]. Moscow: Transport Publ., 1976. 624 p.
20. Vlasevskii S.V., Skorik V.G., Bunyaeva E.V., Fokin D.S. Povyshenie koefitsienta moshchnosti vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya elektrovoza peremennogo toka v rezhimakh tyagi i rekuperativnogo tormozheniya [Increasing the power factor of the rectifier-inverter converter of an AC electric locomotive in traction and regenerative braking modes]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2011, no 1 (20), pp. 2–5.
21. Vlas'evskii S.V., Skorik V.G. Vliyanie raboty oborudovaniya elektrovozov peremennogo toka na kachestvo elektroenergii v tyagovoi seti zheleznykh dorog [Influence of operation of the equipment of AC electric locomotives on the quality of electricity in the traction network of railways]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2010. 103 p.
22. Vlas'evskii S.V., Skorik V.G., Suprun D.A., Bunyaeva E.V., Blazhnov A.I. Sistema opredeleniya povrezhdenii v silovom preobrazovately elektrovoza peremennogo toka v rezhime tyagi [System for determining damage in the power converter of an AC electric locomotive in traction mode]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific notes of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University]. 2020, no 5 (45), pp. 71–77.

### Информация об авторах

**Супрун Демьян Андреевич**, преподаватель кафедры электротехники, электроники и электромеханики, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: suprun.demyan@mail.ru

**Скорик Виталий Геннадьевич**, канд. техн. наук, заведующий кафедрой электротехники, электроники и электромеханики, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: skorik@festu.khv.ru

### Information about the authors

**Demyan A. Suprun**, lecturer of the Department «Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics», Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: suprun.demyan@mail.ru

**Vitaliy G. Skorik**, Ph.D. in Engineering Science, Head of the Department «Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics», Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: skorik@festu.khv.ru

## Анализ эксплуатационного контроля состояния жестких поперечин контактной сети

О. В. Лобанов, В. П. Ступицкий, Л. А. Астраханцев✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г Иркутск, Российской Федерации

✉ astrahancev1943@mail.ru

### Резюме

Высокие темпы развития железнодорожного перевозочного процесса ведут к усложнению систем и оборудования железных дорог. Это обусловлено, в большей степени, возрастанием потребностей перевозки товаров и грузов. В связи с этим увеличиваются требования, обеспечивающие безопасность и надежность движения поездов. Это, в свою очередь, приводит к необходимости усовершенствования систем контроля и разработке новых методов диагностики оборудования железнодорожного транспорта. Одним из наиболее сложных элементов на железной дороге является контактная сеть, так как она не имеет резерва. Выход из строя одного элемента влечет за собой нарушение функционирования всей системы, что напрямую влияет на непрерывность технологического процесса перевозок, а в случае разрушения создает угрозу для безопасности движения поездов и жизни людей. Основные виды нагрузки, действующие на контактные сети, приходятся на опорные конструкции. Авторами предложены к рассмотрению жесткие поперечины контактной подвески многогутевых перегонов и станций. Это важный элемент опорных конструкций, разрушение которых может привести к продолжительному простою поездов и нарушению работы других устройств контактной сети. В статье проведен статистический анализ срока эксплуатации жестких поперечин контактной сети на Восточно-Сибирской железной дороге, рассмотрены нормируемые повреждения и способы определения технического состояния металлических ригелей. Предложено в качестве способа определения напряжений в конструкции использовать моделирование методом конечных элементов. Исследование проведено для различных режимов работы и условий эксплуатации. Сформированы рекомендации по дальнейшей эксплуатации жестких поперечин.

### Ключевые слова

жесткие поперечины, контактная сеть, диагностика оборудования железнодорожного транспорта, металлические опорные конструкции, эксплуатационный контроль, обрыв контактного провода, техническое состояние, действующая нагрузка

### Для цитирования

Лобанов О. В. Анализ эксплуатационного контроля состояния жестких поперечин контактной сети / О. В. Лобанов, В. П. Ступицкий, Л. А. Астраханцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 153–162. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).153-162

### Информация о статье

поступила в редакцию: 23.03.2022 г.; поступила после рецензирования: 28.03.2022 г.; принята к публикации: 29.03.2022 г.

## Analysis of operational control of the contact network rigid crossbars condition

О. В. Лобанов, В. П. Ступицкий, Л. А. Астраханцев✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ astrahancev1943@mail.ru

### Abstract

High rates of development of the railway transportation process lead to the complication of railway systems and equipment. To a greater extent, this is due to the increasing needs for the transportation of goods and cargo. In this regard, the requirements for ensuring the safety and reliability of train traffic are increasing. This, in turn, results in the need to improve control systems and develop new diagnostic methods for railway transport equipment. One of the most complex elements on the railway is the contact network. This is due to the fact that it has no reserve. The failure of one element entails a disruption of the functioning of the entire system, which directly affects the continuity of the technological process of transportation, and in case of destruction poses a threat to the safety of train traffic and people's lives. In turn, the main types of loads affecting the contact network are taken on by the supporting structures. In this article, the authors propose to consider the rigid crossbars of the contact suspension of multi-track crossings and stations. This is an important element of supporting structures, whose destruction can lead to prolonged downtime of trains and disruption of other devices of the contact network. The article presents a statistical analysis of the contact network rigid crossbars service life on the East Siberian Railway. The normalized damages have been analyzed as well as methods of determining the technical condition of metal crossbars. The authors proposed using finite element modeling as a method for determining stresses in the structure. The study was conducted for various operating modes and operating conditions. Based on the results obtained, recommendations were formed for the further operation of rigid crossbars.

**Keywords**

rigid crossbars, contact network, diagnostics of railway transport equipment, metal support structures, operational control, contact wire breakage, technical condition, operating load

**For citation**

Lobanov O. V., Stupitskii V. P., Astrakhantsev L. A. Analiz ekspluatatsionnogo kontrolya sostoyaniya zhestkikh poperechin kontaktnej seti [Analysis of operational control of the contact network rigid crossbars condition]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 153–162. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).153-162

**Article Info**

Received: 23.03.2022; revised: 28.03.2022; accepted: 29.03.2022.

**Введение**

В связи с развитием железнодорожного транспорта происходит увеличение скоростей движения поездов и массы перевозимых грузов. Это ведет к возрастанию нагрузки на всю инфраструктуру железных дорог [1, 2]. В связи с этим появляется потребность в усовершенствовании систем диагностики эксплуатационного состояния устройств и оборудования железных дорог [3–6].

Одним из наиболее важных устройств электрифицированных железных дорог являются металлические конструкции [7–9]. Подвеска контактной сети в условиях многопутевых перегонов, и на железнодорожных станциях осуществляется с использованием металлических жестких поперечин балочного типа [10]. Жест-

кие поперечины представляют собой металлические фермы с параллельными поясами и раскосной решеткой. Решетка треугольная с распорками в каждом узле. Для усиления в узлах устанавливают еще одну распорку по диагонали. Отдельные блоки стыкуют друг с другом накладками из угловой стали.

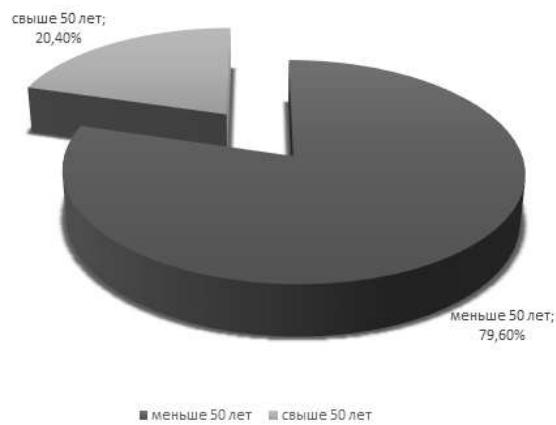
Ригели выступают в качестве опорной конструкции для подвески элементов контактной сети и для установки дополнительных устройств [11, 12].

Каждый пояс и раскос в конструкции рассчитывается и выбирается по предельным состояниям воспринимаемых нагрузок. В связи с этим перед работниками дистанции электроснабжения возникают сложные задачи:

– определить в условиях эксплуатации



Рис. 1. Остродефектная жесткая поперечина по индексу 6.2М  
Fig. 1. Highly defective crossbar by 6.2M index



**Рис. 2.** Распределение жестких поперечин по сроку их эксплуатации  
**Fig. 2.** Operation timing for rigid crossbars

техническое состояние жесткой поперечины;  
 – спрогнозировать динамику текущего состояния [13].

Согласно указаниям по технического обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети [14] по-разному нормируются повреждения сжатых и растянутых конструктивных элементов. На рис. 1 представлена остродефектная жесткая поперечина.

Важным параметром является нормативный срок эксплуатации, который составляет 50 лет [15]. При проведении анализа получены данные (рис. 2), по которым можно сделать вывод, что на Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД) находится 20,4 % жестких поперечин, срок службы которых превышен.

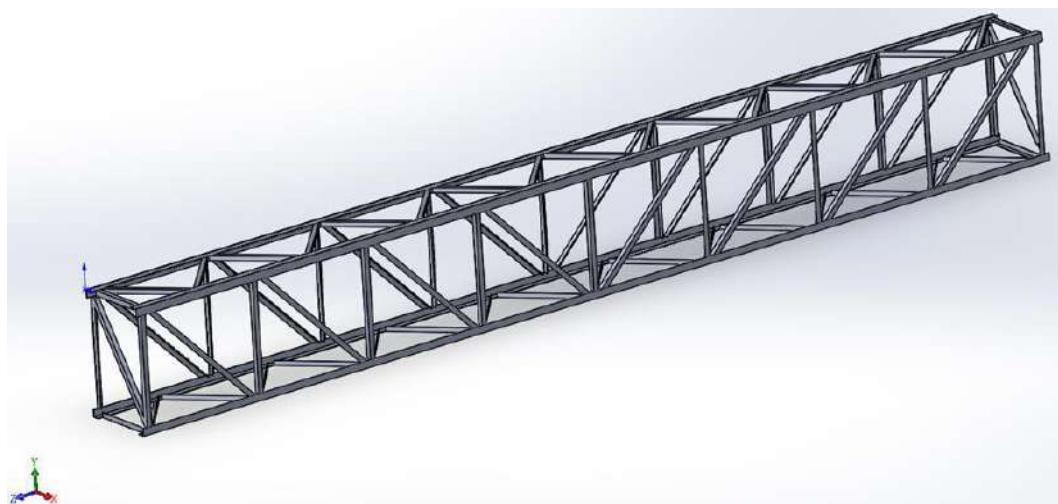
### Подготовка к моделированию

На первом этапе исследования предложе-

но использовать метод конечно-элементного моделирования и программу Solid Works. Проанализированы варианты нагружения жесткой поперечины:

- основное нагружение – основной расчетный случай [16], нагрузка определяется весом поперечины, подвески, элементов освещения и нагрузкой от ветра максимальной интенсивности;
- основное нагружение с учетом обледенения, т. е. дополнительно учитывается вес обледенения поперечины и вес элементов подвески;
- нагружение с односторонним обрывом провода – отсутствует нагрузка со стороны оборванного провода.

В программе Solid Works были смоделированы крайние и средний блок ригеля. На рис. 3 представлена трехмерная модель среднего блока.



**Рис. 3.** Трехмерная модель среднего блока  
**Fig. 3.** 3D model of a middle block

Для выполнения расчёта полученной модели задаются параметры материала, из которого выполнены элементы ригеля [17]. Жесткая поперечина, выбранная для исследования, выполнена из стали марки С245 со следующими характеристиками: плотность  $\rho \approx 7,85 \text{ г/см}^3$ ; модуль Юнга  $E = (2,0-2,1) \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,24 \dots 0,28$ ;

После занесения характеристик, можно приступить к расчету ригеля с помощью метода конечных элементов. Для этого необходимо на каждый элемент модели наложить сетку, которая разбивает ригель на конечное количество подобластей. Следующим шагом подготовки соединяют элементы. Для этого используем функцию «connect», которая имитирует сварное соединения элементов ригеля.

Для получения результатов о распределении нагрузки на жесткой поперечине определяются силы, действующие на элементы ригеля [18].

В исследовании учитывались следующие механические воздействия и нагрузки:

- массовые силы – вес самой конструкции, определяемый согласно проектной документации;
- возможная массовая распределенная нагрузка обледенения;
- возможная распределенная поверхностная ветровая нагрузка, определяемая для самого неблагоприятного расположения поперечины по отношению к ветру;
- сосредоточенные силы в узлах установки подвески контактной сети;
- силы реакции от опор жесткой поперечины.

Анализ конструкции креплений и установки и установки поперечины на опоры позволяет считать эти опоры шарнирным типом крепления. Учен важный фактор – у поперечины в месте крепления к опоре возможно некоторое потенциальное перемещение [19], от чего не в полной мере передаются нагрузки при деформации от ригеля к опорам и с опор на поперечину при их смещении.

### Расчет нагрузок на ригель

Для исследования смоделирован ригель ОРЦ 380-30,3 с расчетной длиной  $l_{расч} = 30,260 \text{ м}$  [20]. Номинальная величина прогиба определяется как:

$$h_{прог} = \frac{1}{150} \cdot l_{расч}.$$

По результатам расчета номинальная величина прогиба ригеля составила  $h_{прог} = 0,202 \text{ м}$ .

Для моделирования необходимо рассчитать нагрузки на жесткой поперечине под действием собственного веса, контактной подвески с учетом гололеда и ветровой нагрузки. Ригель эксплуатируется на линии переменного тока. Подвеска на главных путях ПБСМ-95 + 2МФ-100, на станционных ПБСМ-95 и МФ-100 [21,22].

Собственный вес элементов контактной сети, гололед, ветровой напор заданы в справочниках по проектированию. Для моделирования был выбран район III по гололедному образованию и II ветровой. Расчетная толщина стенки гололеда  $b_e = 0,015 \text{ м}$ , максимальная скорость ветра  $v^2 = 25 \text{ м/с}$ . Длина пролета для расчета нагрузок принята  $l_{пр} = 60 \text{ м}$ .

Вертикальные нагрузки от контактной подвески по оси пути:

$$G_i = (g_h + g_k) \cdot l_{np} + g_a,$$

где  $g_h$  и  $g_k$  – вес 1 м соответственно несущего троса и контактного провода;  $g_a$  – вес армировки по всей длине продольного пролета.

По осям главных путей нагрузка равна  $G_{e1} = 1932,4 \text{ Н}$ , по осям станционных путей  $G_{cm} = 1396 \text{ Н}$ . Определяется вертикальная нагрузка от гололеда на проводах контактной подвески и струнах:

$$G_{ie} = (g_{eh} + g_{ek} + g_{ecmp}) \cdot l_{np},$$

где  $g_{eh}$ ,  $g_{ek}$  – вес гололеда на 1 м соответственно несущего троса и контактного провода;  $g_{ecmp}$  – вес гололеда на струнах, приведенных к весу гололеда на 1 м пролета.

Подробные расчеты представлены в учебных пособиях по проектированию контактной сети [23]. Полученные результаты нагрузки по рассматриваемым параметрам следующие: по осям главных путей  $G_{e1e} = 1383,84 \text{ Н}$ ; по осям станционных путей  $G_{cm1} = 1025,52 \text{ Н}$ .

Далее рассчитываем нагрузку на ригель от ветра максимальной интенсивности:

$$P_p = \gamma \cdot v^2,$$

где  $\gamma$  – коэффициент учитывающий сопротивление ригеля ветровому напору.

Значение нагрузки на ригель от ветра получилось  $P_p = 300 \text{ Н/м}$ .

Полученные значения нагрузок указывались в программе Solid Works в зависимости от моделируемого случая.

## Результаты моделирования

### 1. Основное нагружение

В данном случае рассматривается работа жесткой поперечины под нормальной эксплуатационной нагрузкой. Основные результаты измерения приведены в табл. 1.

На рис. 4 представлена схема расположения сжатых и растянутых зон на элементах конструкции (красным цветом отмечены элементы, работающие на сжатие), на рис. 5 – схема перемещения жесткой поперечины при нормальном условии эксплуатации. Значение прогиба ригеля находится в пределах допустимых значений, что не влияет на работу жесткой поперечины.

Программа Solid Works строит световую шкалу, показывая влияние распределения

нагрузки на максимальные значения напряжений, а также места, в которых они будут находиться, что позволяет быстро и качественно выполнять анализ данных.

На рис. 4 видно, что верхние пояса жесткой поперечины работают на сжатие, а нижние на растяжение. Раскосы в основном работают на сжатие.

### 2. Основное нагружение с учетом обледенения

На втором этапе к основным нагрузкам в программе дополнительно включены усилия, передаваемые жесткой поперечине от веса гололеда на проводах контактной подвески и самом ригеле. Численные результаты моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 1. Результаты расчета при основном нагружении

Table 1. Calculation results under basic loading

№ п/п	Параметр Parameter	Единицы измерения Measures	Величина Magnitude	
			Минимум Minimum	Максимум Maximum
1	Напряжение - 1 главное Main stress - 1	кН/м <sup>2</sup>	-142 328	485 134
2	Перемещение - по вертикали Movement - vertical	мм	3,13	-39,50
3	Допустимое значение прогиба Allowable deflection value	мм	-202	

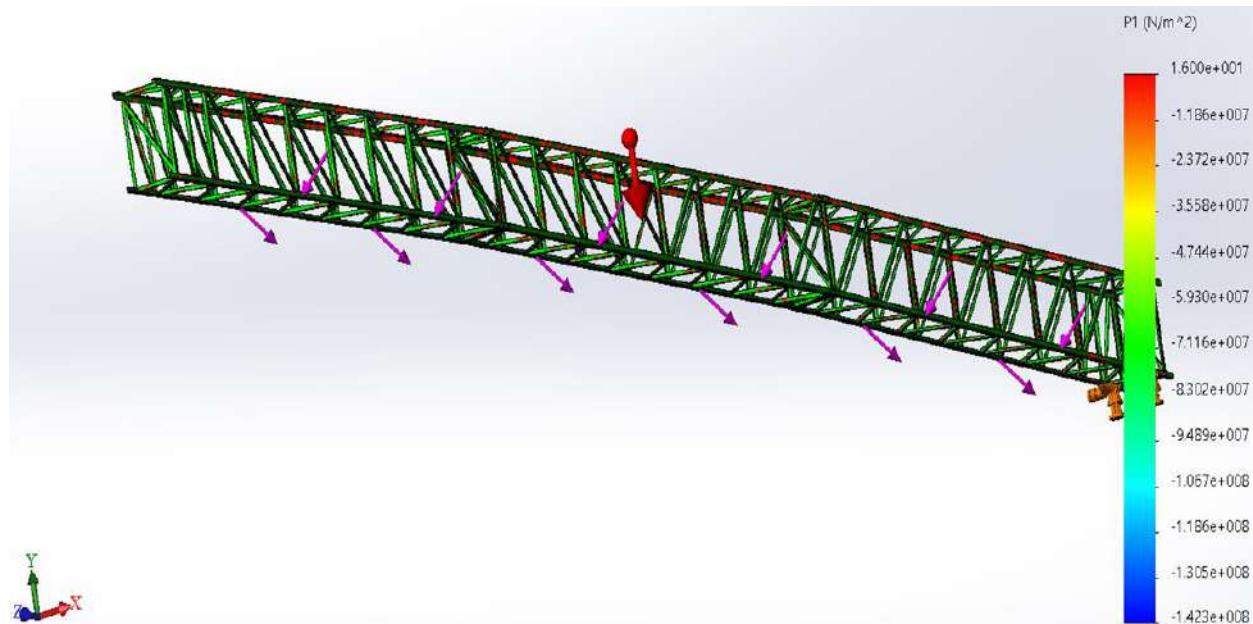
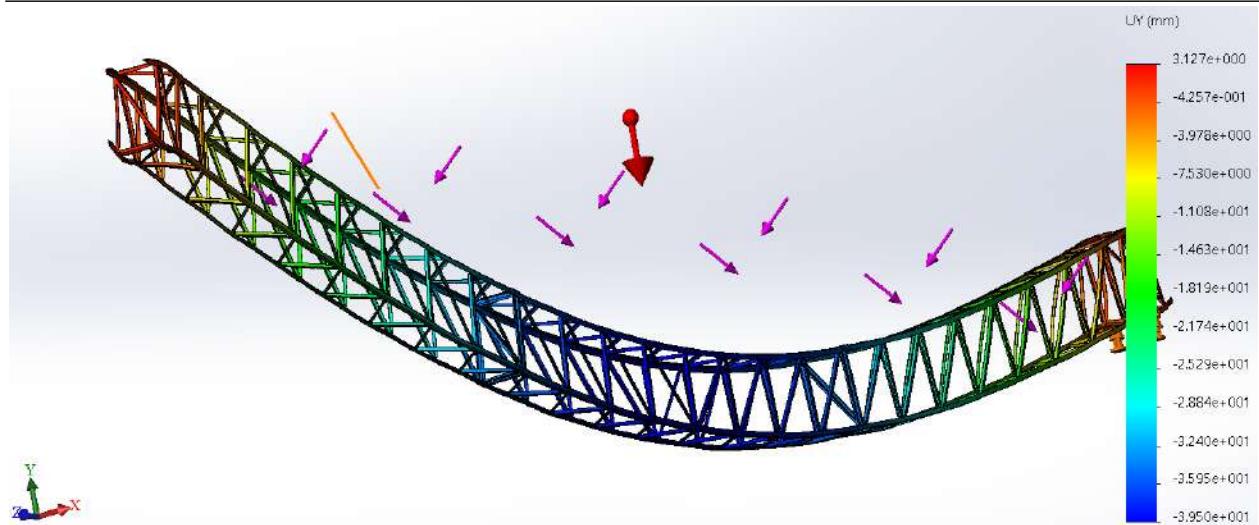


Рис. 4. Схема расположения растянутых и сжатых элементов поперечины при основном нагружении

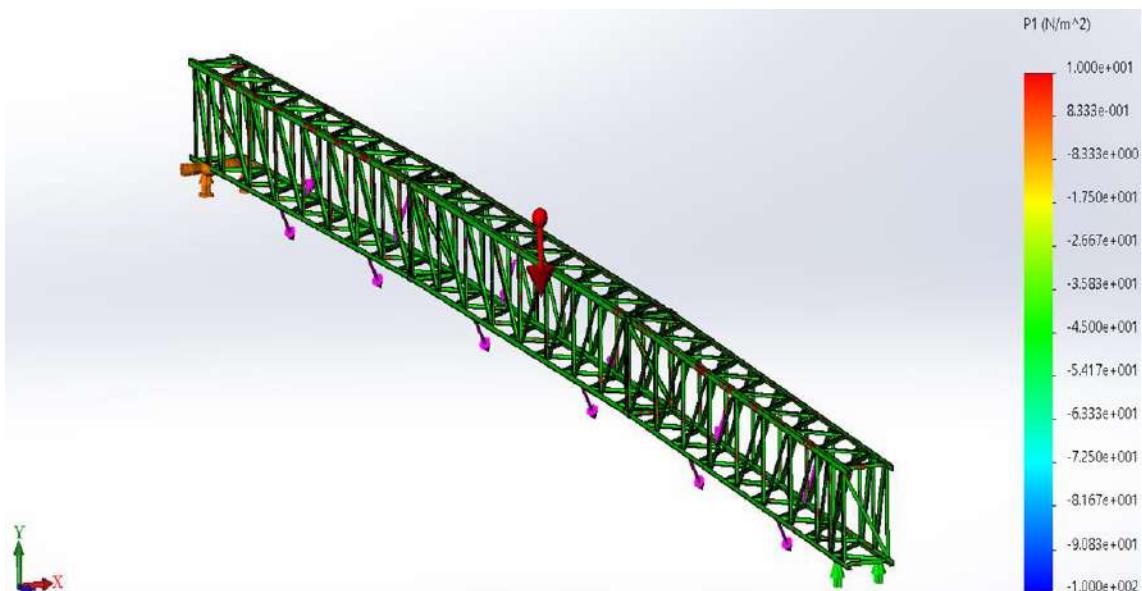
Fig. 4. Position scheme for stretched and compressed elements under basic loading



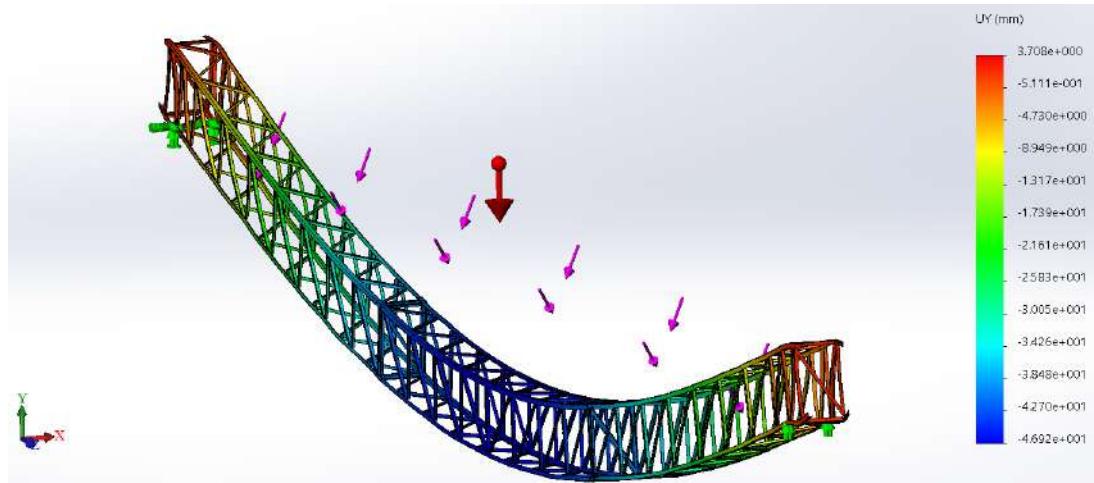
**Рис. 5.** Перемещение по вертикали при основном нагружении  
**Fig. 5.** Vertical movement under basic loading

**Таблица 2.** Результаты расчета при нагружении с гололедом  
**Table 2.** Calculation results under loading with sleet

№ п/п	Параметр Parameter	Единицы измерения Measures	Величина Magnitude	
			Минимум Minimum	Максимум Maximum
1	Напряжение – 1 главное Main stress - 1	кН/м <sup>2</sup>	-168 055	580 457
2	Перемещение - по вертикали Movement - vertical	мм	3,71	-46,92
3	Допустимое значение прогиба Allowable deflection value	мм		-202



**Рис. 6.** Схема расположения растянутых и сжатых элементов поперечины при нагружении с гололедом  
**Fig. 6.** Position scheme for stretched and compressed elements of the crossbar under loading with sleet



**Рис. 7.** Перемещение по вертикали при нагружении с гололедом  
**Fig. 7.** Vertical movement under loading with sleet

На рис. 6 показана схема расположения сжатых и растянутых элементов конструкции при дополнительной нагрузке от гололеда, на рис. 7 – результаты изменения прогиба демонстрируют увеличение значений в отличие от нагрузки без гололеда. Величина прогиба находится в допустимых значениях и не влияет на работу жесткой поперечины.

Результаты позволяют утверждать, что при увеличении нагрузки расположение сжатых и растянутых зон не меняется по сравнению с основным нагружением. Верхние пояски и раскосы так же работают на сжатие, а нижние на растяжение. Что соответствует расчетам при проектировании.

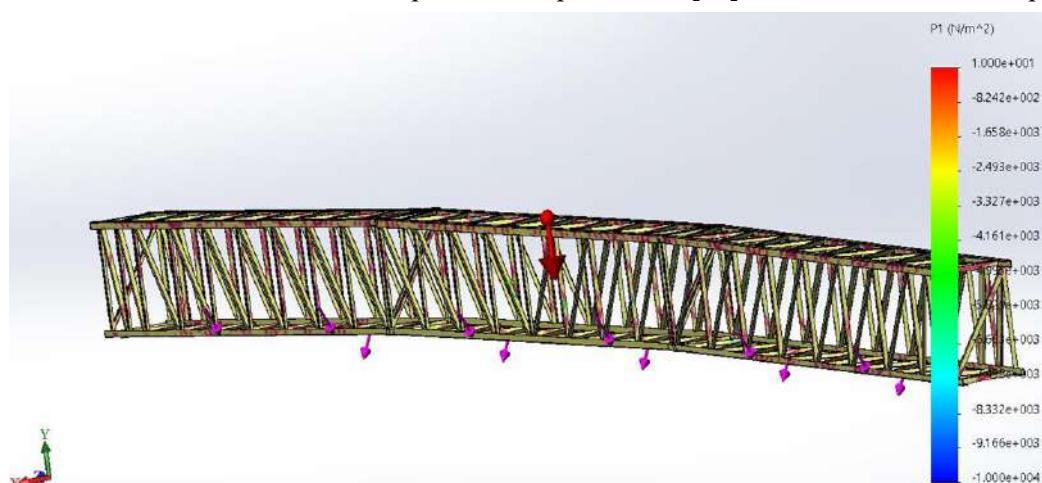
3. Нагружение с обрывом одного провода. На данном этапе были смоделированы

нагрузки на жесткую поперечину при обрыве крайнего провода контактной подвески.

Если рассматривать модель в программе (рис. 8) видно, что отсутствует нагрузка от контактной подвески, действующая вертикально. Это имитирует обрыв одного пути контактной подвески. Результаты, полученные в ходе данного этапа моделирования, представлены в табл. 3.

Расположение сжатых и растянутых зон (см. рис 8) позволяет говорить об изменении реакции жесткой поперечины на действующие нагрузки. В нижнем поясе ригеля появились места, в которых происходит работа элементов на сжатие.

Распределение нагрузки отличается от проектных [18]. Исходя из типовых расчетов,



**Рис. 8.** Схема расположения растянутых и сжатых элементов поперечины при нагружении с обрывом провода

**Fig. 8.** Position scheme for stretched and compressed elements of the crossbar under loading with wire break

нижний пояс ригеля работает на растяжение, в связи с этим он выполнен из уголков меньшего сечения. В рассматриваемом варианте появляются места с работой на сжатие в нижнем поясе, что приводит к нарушению конструкции ригеля в эксплуатационных условиях. Верхний пояс и раскосы работают на сжатие, что соответствует проектным расчетам.

На рис. 9 представлены вертикальные перемещения жесткой поперечины под действием нагрузки. Уменьшение прогиба ригеля на 16,77 мм в сравнении с нормальным нагружением, объясняется уменьшением нагрузки на жесткую поперечину, а именно отсутствием силы от одной из контактных подвесок. Произошло смещение стрелы провеса, влияющее на перераспределение нагрузки на ригеле. Для полного понимания работы жесткой поперечины нужны дополнительные исследования.

## Заключение

По результатам моделирования сформируем ряд выводов:

1. В каждом исследовании нагрузка на

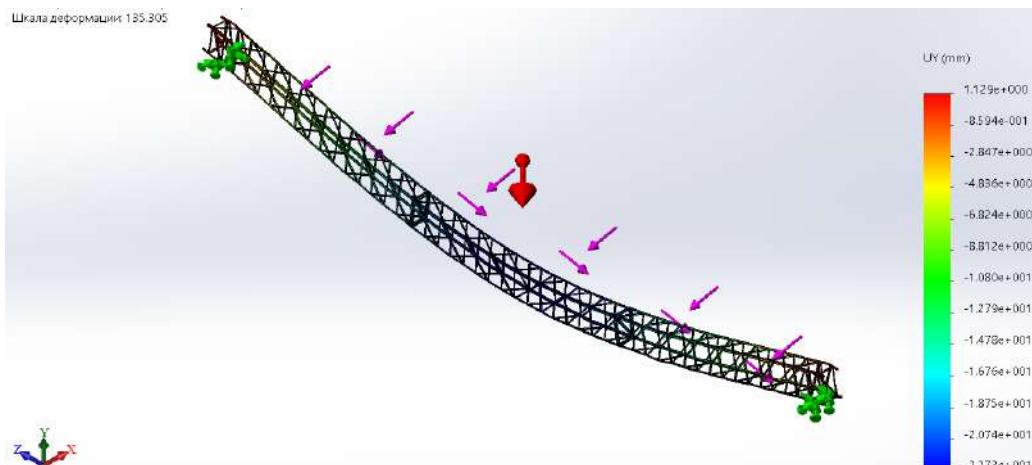
ригель не превышала расчетных значений. Жесткая поперечина, испытывая данные нагрузки, будет находиться в работоспособном состоянии.

2. По результатам испытания с обрывом провода произошло изменение распределения нагрузки на ригеле, а при эксплуатации на жесткой поперечине могут возникнуть погнутости. Они нормируются согласно инструкции [12], в которой указаны различные допуски для сжатых и растянутых зон конструкции. Может возникнуть ситуация, когда обрыв провода приведет к изменению нагрузки, и в зону сжатой работы попадет повреждение или элемент, не рассчитанные на данную нагрузку. Это может привести к появлению дополнительных погнутостей или полному разрушению конструкции.

3. Для полного анализа учитываются особенности каждой отдельной конструкции. Множество дополнительных факторов влияют на состояние жесткой поперечины. Получение достоверной информации зависит от ряда параметров и условий эксплуатации:

**Таблица 3.** Результаты расчета при нагружении с обрывом провода  
**Table 3.** Calculation results under loading with wire break

№ п/п	Параметр Parameter	Единицы измерения Measures	Величина Magnitude	
			Минимум Minimum	Максимум Maximum
1	Напряжение - 1 главное Main stress - 1	кН/м <sup>2</sup>	-48 432	463 497
2	Перемещение - по вертикали Movement - vertical	мм	1,13	-22,73
3	Допустимое значение прогиба Allowable deflection value	мм		-202



**Рис. 9.** Перемещение по вертикали при нагружении с обрывом провода  
**Fig. 9.** Vertical movement under loading with wire break

- частота следования поездов и их скорость;
- наличие повреждений на ригеле, которые могут вызывать дополнительные нагрузки,
- режимы работы контактной подвески,
- угол наклона опоры и воздействие грунта на ее положение,
- техническое состояние опор,

– аварийные случаи на контактной сети.

Хотелось бы отметить, что развитие исследований в данной области может позволить усовершенствовать процесс диагностики как жестких поперечин, так и металлических опор контактной сети. Это даст возможность увеличить надёжность и безопасность движения поездов.

### Список литературы

1. Пузина Е.Ю. Усиление устройств системы тягового электроснабжения // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2021. Т. 1. С. 348–353.
2. Чекулаев В.Е., Зайцев А.И. Повышение надежности работы контактной сети и воздушных линий. М. : Транспорт, 1992. 128 с.
3. Крюков А.В., Черепанов А.В., Крюков Е.А. Моделирование электромагнитных влияний гибкого симметричного токопровода на протяженные металлические конструкции // Труды Брат. гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки. 2021. Т. 1. С. 118–124.
4. Гасельник В.В., Лопатин М.В. Проблемы и перспективы применения двухчастотного электромагнитного метода неразрушающего контроля при ремонте и диагностике ферромагнитных деталей подвижного состава // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2012. Т. 1. С. 226–229.
5. Окунев А.В., Галкин А.Г., Ковалев А.А. Определение предельных состояний опор контактной сети на основе математического моделирования изменения их несущей способности // Изв. Транссиба. 2019. № 2 (38). С. 82–90.
6. Лобанов О.В. Система мониторинга работоспособности металлических опорных конструкций для скоростного и высокоскоростного движения электроподвижного состава // Инновационные производственные технологии и ресурсосберегающая энергетика : материалы междунар. науч.-практ. конф. Омск, 2021. С. 245–250.
7. Филиппов Д.М., Ступицкий В.П., Лобанов О.В. Проблемы диагностики параметров контактной сети // Молодая наука Сибири. 2021. № 2(12). С. 125–131.
8. Расчет несущей способности металлической решетчатой опоры контактной сети при кручении верхней части методом конечных элементов в САПР Femap / В.П. Ступицкий, И.А. Худоногов, В.А. Тихомиров и др. // Транспорт Урала. 2021. № 1 (68). С. 99–102. DOI 10.20291/1815-9400-2021-1-99-102.
9. Определение остаточной несущей способности металлических конструкций контактной сети / В.П. Ступицкий, И.А. Худоногов, В.А. Тихомиров и др. // Изв. Транссиба. 2019. № 3 (39). С. 88–99.
10. Коптев А.А., Коптев И.А. Сооружение, монтаж и эксплуатация устройств электроснабжения. Монтаж контактной сети. М. : УМЦ ЖДТ, 2007. 478 с.
11. Борц Ю.В., Чекулаев В.Е. Контактная сеть. М. : Транспорт, 2001. 247 с.
12. Беляев И.А. Устройства контактной сети на зарубежных дорогах. М. : Транспорт, 1991. - 192с.
13. Ерохин Е.А. Устройство, эксплуатация и техническое обслуживание контактной сети и воздушных линий. М. : УМЦ ЖДТ, 2007. 404 с.
14. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети : Н К-146-08. М. : Транспорт, 2008. 120 с.
15. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1982. 528 с.
16. Воронин А.В. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 2010. 296 с.
17. Горошков Ю.И., Бондарев Н.А. Контактная сеть. М. : Транспорт, 2011. 400с.
18. Кудрявцев А.А. Несущая способность опорных конструкций контактной сети. М. : Транспорт, 1988. 160 с.
19. Михеев В.П. Контактные сети и линии электропередачи. М. : Транспорт, 2006. 415 с.
20. Типовой проект №5254 Унифицированные конструкции жестких поперечин балочного типа. Научно-исследовательский институт транспортного строительства, 2006. 72 с.
21. Бондарев Н.А., Чекулаев В.Е. Контактная сеть. М. : Транспорт, 2006. 589 с.
22. Справочник по электроснабжению железных дорог. Под ред. К.Г. Марквардта. М. : Транспорт, 1981. 392 с.
23. Фрайфельд А.В. Проектирование контактной сети. М. : Транспорт, 2014. 328 с.

### References

1. Puzina E.Yu. Usilenie ustroistv sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Strengthening of traction power supply system devices]. Materialy Vserossiyskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri» [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Increasing the efficiency of energy production and use in Siberia»]. Irkutsk, 2021, Vol. 1, pp. 348–353.
2. Chekulaev V.E., Zaitsev A.I. Povyshenie nadezhnosti raboty kontaktnoi seti i vozдушnykh linii [Improving the reliability of the contact network and overhead lines]. Moscow: Transport Publ., 1992. 128 p.
3. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Kryukov E.A. Modelirovaniye elektromagnitnykh vliyanii gibkogo simmetrichnogo tokoprovoda na protyazhennye metallicheskie konstruktsii [Modeling of electromagnetic influences of a flexible symmetrical cur-

rent pipeline on extended metal structures]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences]. 2021, Vol. 1, pp. 118–124.

4. Gasel'nik V.V., Lopatin M.V. Problemy i perspektivy primeneniya dvukhchastotnogo elektromagnitnogo metoda nerazrushayushchego kontrolya pri remonte i diagnostike ferromagnitnykh detalei podvizhnogo sostava [Problems and prospects of applying the two-frequency electromagnetic method of non-destructive testing in the repair and diagnostics of ferromagnetic parts of rolling stock]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskego regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. 2012, Vol. 1, pp. 226–229.

5. Okunev A.V., Galkin A.G., Kovalyov A.A. Opredelenie predel'nykh sostoyaniy opor kontaktnej seti na osnove matematicheskogo modelirovaniya izmeneniya ikh nesushchey sposobnosti [The definition of the limit states of catenary supports on the basis of mathematical modeling of changes in their carrying capacity]. *Izvestiya Transsib* [Bulletin of the Transsib]. 2019, no 2 (38), pp. 82–90.

6. Lobanov O.V. Sistema monitoringa rabotosposobnosti metallicheskikh opornykh konstruktsii dlya skorostnogo i vysokoskorostnogo dvizheniya elektropodvizhnogo sostava [System for monitoring the operability of metal support structures for high-speed and high-speed movement of electric rolling stock]. *Materialy mezdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnye proizvodstvennye tekhnologii i resursosberegayushchaya energetika»* [Materials of the international scientific and practical conference «Innovative production technologies and resource-saving energy»]. Omsk, 2021, pp. 245–250.

7. Filippov, D.M., Stupnitskii V.P., Lobanov O.V. Problemy diagnostiki parametrov kontaktnej seti [Problems of diagnostics of contact network parameters]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia]. 2021, no 2(12), pp. 125–131.

8. Stupitskii V.P., Khudonogov I.A., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. Raschet nesushchey sposobnosti metallicheskoi reshetkoi opory kontaktnej seti pri kruchenii verkhnei chasti metodom konechnykh elementov v SAPR Femap [Calculation of bearing capacity of metal lattice catenary pole at torsion of the upper part by finite element method in the Femap CAD]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2021, no 1(68), pp. 99–102. DOI 10.20291/1815-9400-2021-1-99-102.

9. Stupitskii V.P., Khudonogov I.A., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. Opredelenie ostatochnoi nesushchey sposobnosti metallicheskikh konstruktsii kontaktnej seti [Determination of residual bearing capacity of metal structures of the contact network]. *Izvestiya Transsib* [Bulletin of the Transsib]. 2019, no 3(39), pp. 88–99.

10. Koptev A.A., Koptev I.A. Sooruzhenie, montazh i ekspluatatsiya ustroistv elektrosnabzheniya. Montazh kontaktnej seti [Construction, installation and operation of power supply devices. Installation of the contact network: a textbook for universities of railway transport]. Moscow: UMTS ZHDT Publ., 2007. 478 p.

11. Borts Yu.V., Chekulaev V.E. Kontaktная сеть [Contact network]. Moscow: Transport Publ., 2001. 247 p.

12. Belyaev I.A. Ustroistva kontaktnej seti na zarubezhnykh dorogakh [Contact network devices on foreign roads]. Moscow: Transport Publ., 1991. 192 p.

13. Erokhin E.A. Ustroistvo, ekspluatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie kontaktnej seti i vozdushnykh linii [Device, operation and maintenance of the contact network and overhead lines]. Moscow: UMTS ZHDT Publ., 2007. 404 p.

14. Uzakaniya po tekhnicheskemu obsluzhivaniyu i remontu opornykh konstruktsii kontaktnej seti [Instructions for maintenance and repair of support structures of the contact network: N K-146-08]. Moscow: Transport Publ., 2008. 120 p.

15. Markvardt K.G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Electricity supply of electrified railways]. Moscow: Transport Publ., 1982. 528 p.

16. Voronin A.V. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Electricity supply of electrified Railways]. Moscow: Transport Publ., 2010. 296 p.

17. Goroshkov Yu.I., Bondarev N.A. Kontaktная сеть [Contact network]. Moscow: Transport Publ., 2011. 400 p.

18. Kudriavtsev A.A. Nesushchaya sposobnost' opornykh konstruktsii kontaktnej seti [The bearing capacity of the supporting structures of the contact network]. Moscow: Transport Publ., 1988. 160 p.

19. Mikheev V.P. Kontaktne seti i linii elektroperedachi [Contact networks and power lines]. Moscow: Transport Publ., 2006. 415 p.

20. Tipovoi proekt №5254 Unifitsirovannye konstruktsii zhestkikh poperechin balochnogo tipa [Standard project No. 5254 Unified designs of rigid beam-type crossbars]. Nauchno-issledovatel'skiy institut transportnogo stroitel'stva Publ., 2006. 72 p.

21. Bondarev N.A., Chekulaev V.E. Kontaktная сеть [Contact network]. Moscow: Transport Publ., 2006. 589 p.

22. Markvardt K.G. (Edit) Spravochnik po elektrosnabzheniyu zheleznykh dorog [Handbook of railway power supply]. Moscow: Transport Publ., 1981. 392 p.

23. Frayfeld A.V. Proektirovaniye kontaktnej seti [Contact network design]. Moscow: Transport Publ., 2014. 328 p.

### Информация об авторах

**Лобанов Олег Викторович**, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: oleg.6965@mail.ru

**Ступицкий Валерий Петрович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: dokasvp@mail.ru

**Астраганцев Леонид Алексеевич**, д-р. техн. наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astrahancev1943@mail.ru

### Information about the authors

**Oleg V. Lobanov**, Ph.D. student of the Subdepartment «Electrical Power Industry of Transport», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: oleg.6965@mail.ru

**Valeriy P. Stupitskii**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment «Electrical Power Industry of Transport», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: dokasvp@mail.ru

**Leonid A. Astrakhantsev**, Doctor of Engineering Science, Professor, the Full Professor of the Subdepartment «Electrical Power Industry of Transport», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: astrahancev1943@mail.ru

## Оценка надежности рельсовых скреплений на основе экспертной информации с использованием метода Монте-Карло

Ю. М. Krakovskii<sup>1</sup>, В. О. Belyakov<sup>2</sup>, В. А. Nachigin<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ nachiginv@yandex.ru

### Резюме

В статье приводится описание созданного программно-математического обеспечения оценки показателей надежности рельсовых скреплений железнодорожного пути. В качестве математической модели наработки принято трехпараметрическое треугольное распределение, параметры которого выбирают эксперты. Показателями надежности выбраны: вероятность безотказной работы; средняя наработка; гамма-процентный ресурс. Для создания программного обеспечения использовалась среда разработки Visual Studio 2019. Код написан на языке программирования C#. Возможность получения аналитических значений показателей надежности позволила провести тестирование их численных моделей. С применением метода Монте-Карло и созданного программного обеспечения проведено исследование влияния неопределенности на выбранные показатели надежности при условии, что среднее значение наработки является случайной величиной. В качестве вероятностной модели для среднего значения наработки в условиях неопределенности предложено бета-распределение с двумя вариантами значений параметров: бета-распределение является равномерным законом; бета-распределение близко к нормальному закону. Показано, что полученные численные значения средней наработки с учетом неопределенности для обоих вариантов значений параметров попадают в доверительный интервал. Более того, доверительные интервалы для этих вариантов пересекаются. В результате можно сделать вывод, что оценки средних значений для представленных вариантов статистически неразличимы. Однако моделирование показало, что гамма-процентный ресурс по первому варианту отличается от аналитического значения на 2,24 %. В абсолютных значениях из-за неопределенности среднего значения наработки гамма-процентный ресурс снизился на 5,1 млн ткм. Этот факт учитывается в процессе принятия управленческих решений при обслуживании рельсовых скреплений железнодорожного пути.

### Ключевые слова

показатели надежности, рельсовые скрепления, экспертный подход, неопределенность исходных данных, метод Монте-Карло

### Для цитирования

Краковский Ю. М. Оценка надежности рельсовых скреплений на основе экспертной информации с использованием метода Монте-Карло / Ю. М. Krakovskii, В. О. Belyakov, В. А. Nachigin // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 163–169. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).163-169

### Информация о статье

поступила в редакцию: 18.01.2022 г.; поступила после рецензирования: 25.01.2022 г.; принята к публикации: 27.01.2022 г.

## Assessment of the reliability of rail fasteners based on expert information using the Monte Carlo method

Yu. M. Krakovskii<sup>1</sup>, V. O. Belyakov<sup>2</sup>, V. A. Nachigin<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevskii, Irkutsk, the Russian Federation

✉ nachiginv@yandex.ru

### Abstract

The created software and mathematical support for the evaluation of reliability indicators of rail fasteners of the railway track is given. As a mathematical model of operating time, a three-parameter triangular distribution is adopted, whose parameters are chosen by experts. As reliability indicators, the following factors were selected: the probability of a failure-free operation; average operating time; gamma percent resource. The Visual Studio 2019 development environment was used to create the software. The code is written in the C# programming language. The possibility of obtaining analytical values of reliability indicators made it possible to test their numerical models. Using the Monte Carlo method and the created software, the study of the influence of uncertainty upon the selected reliability indicators was carried out, the average operating time being a random variable. As a probabilistic model for the average value of operating time under uncertainty, a beta distribution with two variants of parameter values is proposed: the beta distribution is a uniform law; the beta distribution is close to the normal law. It is shown that the obtained numerical values of the average operating time, the uncertainty for both variants of parameter values taken into account, fall into the confidence interval. Moreover, the confidence intervals for both variants overlap. Based on these results, it can be

concluded that the estimates of the mean values for these variants are statistically indistinguishable. But at the same time, the simulation results showed that the gamma percentage resource for option 1 differs from the analytical value by 2.24%. In absolute terms, due to the uncertainty of the average gamma value, the percentage resource decreased by 5.1 million tkm. And this fact should be taken into account when making management decisions on servicing rail fasteners of a railway track.

### Keywords

reliability indicators, rail fasteners, expert approach, uncertainty of initial data, Monte Carlo method

### For citation

Krakovskii Yu. M., Belyakov V. O., Nachigin V. A. Otsenka nadezhnosti rel'sovykh skreplenii na osnove ekspertnoi informatsii s ispol'zovaniem metoda Monte-Karlo [Assessment of the reliability of rail fasteners based on expert information using the Monte Carlo method]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 163–169. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).163-169

### Article Info

Received: 18.01.2022; revised: 25.01.2022; accepted: 27.01.2022.

### Введение

Железнодорожный путь содержит множество компонентов: рельсы, шпалы, подкладки, земляное полотно и др. Соединяют эти компоненты рельсовые скрепления различных типов, например, скрепление ПФК-350, скрепление ЖБР, скрепление SBS SL-1 компании Schwiag AG и др. [1–5].

Вопросу надежности железнодорожного пути, его мониторингу и диагностики посвящено значительное число публикаций [5–11]. Это связано с тем, что надежный железнодорожный путь, содержащий рельсовые скрепления, обеспечивает безопасную перевозку грузов и пассажиров. Дополнительно, только при высокой надежности железнодорожного пути и связанной с ним инфраструктуры, возможно повышение провозной и пропускной способностей перевозочного процесса железнодорожным транспортом [12–16].

Отказы скреплений происходят по различным причинам, при этом их относят к невосстанавливаемым объектам. При эксплуатации пути важно уметь определять показатели надежности скреплений, используя экспертную информацию с учетом неопределенности. На железной дороге наработка измеряется в единицах грузонапряженности (млн ткм). Это позволяет в расчетах использовать условные единицы ( усл. ед), когда, например, одна единица равна 50 млн ткм [2, 5].

Таким образом, необходимость оценки надежности рельсовых скреплений железнодорожного пути является актуальной задачей, требующей своего решения. Целью работы является повышение эффективности принятия управленческих решений за счет разработки и применения программно-математического

обеспечения оценки показателей надежности рельсовых скреплений.

### Программно-математическое обеспечение оценки надежности рельсовых скреплений

В данном исследовании предполагается, что эксперты задают диапазон изменения наработки рельсового скрепления ( $a, b$ ) и ее среднее значение ( $\bar{x}$ ), усл. ед. Это позволяет выбрать в качестве вероятностной модели наработки трехпараметрическое треугольное распределение с функцией распределения:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{(x-a)^2}{(b-a) \cdot (c-a)}, & a < x \leq c \\ 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a) \cdot (b-c)}, & c < x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}, \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – минимальное и максимальное значение наработки (информация экспертов), а  $c$  – наиболее вероятное значение. При известном среднем значении (информация экспертов), этот параметр равен:

$$c = 3 \cdot \bar{x} - (a + b). \quad (2)$$

Зная (1), находим модель определения значений времени наработки:

$$x = \begin{cases} a + \sqrt{r(b-a) \cdot (c-a)}, & 0 < r \leq \frac{c-a}{b-a} \\ b - \sqrt{(1-r) \cdot (b-a) \cdot (b-c)}, & a < x \leq c \\ \frac{c-a}{b-a} < r < 1 \\ c < x < b \end{cases}, \quad (3)$$

где  $r$  – значение псевдослучайной величины, равномерно распределенной на интервале (0, 1).

С применением метода Монте-Карло, по модели (3) создается выборка нужного объема (4), а затем находятся точечная оценка средней

наработка ( $\tilde{x}$ ) и ее доверительный интервал (5) ( $x_1, x_2$ ):

$$X = (x_q, q = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n x_q; \quad x_1 = \tilde{x} - \delta; \quad x_2 = \tilde{x} + \delta, \quad (5)$$

где

$$\delta = \frac{z_y \cdot s}{\sqrt{n}}; \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^n x_q^2 - n \cdot \tilde{x}^2}{n-1}}. \quad (6)$$

Здесь  $n$  – объем выборки;  $x_q$  – выборочные значения наработки (4);  $z_y$  – квантиль нормированного нормального распределения для доверительной вероятности  $y$ ;  $s$  – оценка среднеквадратического отклонения.

Выбранное экспертами значение средней наработки должно попасть в доверительный интервал (5) с учетом (6).

Показателями надежности рельсовых скреплений в работе являются: вероятность безотказной работы ( $P(x)$ ); средняя наработка ( $\bar{x}$ ); гамма процентный ресурс для вероятности  $\gamma(x_\gamma)$ . Для распределения (1) эти показатели равны:

$$P(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - \frac{(x-a)^2}{(b-a) \cdot (c-a)}, & a < x \leq c \\ \frac{(b-x)^2}{(b-a) \cdot (b-c)}, & c < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases}$$

$$\bar{x} = \frac{a+b+c}{3};$$

$$x_\gamma = \begin{cases} a + \sqrt{(1-\gamma) \cdot (b-a) \cdot (c-a)}, & \frac{c-a}{b-a} \leq \gamma < 1 \\ b - \sqrt{\gamma \cdot (b-a) \cdot (b-c)}, & 0 < \gamma < \frac{c-a}{b-a} \end{cases} \quad (7)$$

При использовании выборочных значений (4), численные выбранные показатели надежности будут иметь вид:

– численная вероятность безотказной работы

$$P_r(x) = \begin{cases} 1, & x \leq x_0 \\ k_{j-1} + (x - x_{j-1}) \cdot (k_j - x_{j-1}) \cdot \frac{x_j - x_0}{J}, & x_0 < x < x_j \\ 0 & x \geq x_j \end{cases} \quad (8)$$

где  $x_{j-1} < x \leq x_j, j = \overline{1, J}$ ;

– численная средняя наработка

$$\bar{x}_r = \int_0^J P_r(x) dx = x_0 + \frac{x_J - x_0}{J} \cdot \left( 0,5 + \sum_{j=1}^{J-1} k_j \right); \quad (9)$$

– численный гамма процентный ресурс

$$x_r(\gamma) = x_{j-1} + \frac{\gamma - k_{j-1}}{k_j - k_{j-1}} \cdot \frac{x_J - x_0}{J}, \quad k_j < \gamma \leq k_{j-1}, j = \overline{1, J}. \quad (10)$$

В моделях (8)–(10)  $k_j$  – обратная величина относительных частот

$$k_j = 1 - m_j; \quad j = \overline{1, J}, \quad k_0 = 1, \quad k_J = 0,$$

где  $J$  – число интервалов группировки выборочных значений;  $x_j$  – узлы.

Для гамма процентного ресурса определим относительную погрешность в процентах

$$\Delta x_\gamma = 100 \cdot |x_\gamma - x_r(\gamma)| / x_\gamma \quad (11)$$

Для создания программного обеспечения использовалась среда разработки Visual Studio 2019. Код написан на языке программирования C#. Преимущества языка программирования в среде Visual Studio заключаются в следующем [17, 18]:

1. C# использует объектно-ориентированный подход программирования;

2. C# относится к языкам компилируемого типа, а значит обладает всеми преимуществами этих языков;

3. C# обладает большой надежностью из-за работы CLR машины;

4. C# обладает большим количеством синтаксических конструкций и возможностью работать с платформой «.NET», что позволяет быстрее разрабатывать программное обеспечение.

## Исходные данные и результаты вычислений

В данном исследовании рассмотрено два случая выбора среднего значения наработки:

1. эксперты это значение задают в виде числа. В этом случае параметр (2) также является числом, а выборка (4) с учетом (3), имеет значения распределения (1);

2. эксперты, учитывая условия неопределенности, считают среднее значение наработки случайной величиной на интервале ( $m_1, m_2$ ). В качестве вероятностной модели предлагается

бета-распределение с параметрами  $(p, q)$ . В этом случае параметр (2) также является случайной величиной, а выборка (4) с учетом (3), имеет значения, отличные от распределения (1).

Далее с применением метода Монте-Карло и созданного программного обеспечения, исследуется влияние условий неопределенности на выбранные показатели надежности. Рассмотрено два варианта значений параметров  $(p, q)$ :

–  $p = q = 1$ , вариант равномерного закона на интервале  $(m_1, m_2)$ ;

–  $p = q = 4$ , вариант, удовлетворяющий правилу «трех сигм», характерный для нормального закона. В этом случае интервал  $(m_2 - m_1)$  равен шести значениям среднеквадратического отклонения.

Вычисления по созданному программно-математическому обеспечению проведем при следующих исходных данных, выбранных экспертами:  $a = 2,0$ ;  $b = 12,0$ ;  $\bar{x} = 7,5$ ; параметр  $c$  (2) равен 8,5;  $n=10000$ ;  $\gamma = 0,90$ .

В табл. 1 приведены результаты вычислений для первого случая, когда эксперты среднее значение наработки задают в виде числа.

Таблица 1. Результаты вычислений

для первого случая

Table 1. Calculation results for the first case

$\tilde{x}$	$x_1$	$x_2$
7,524	7,483	7,564
$\bar{x}_r$	$x_r (\gamma)$	$\Delta x_\gamma, \%$
7,525	4,549	4,600

Из табл. 1 видно, что выбранное экспертиами среднее значение наработки и полученное численное значение наработки (9) попадают в доверительный интервал (5). Гамма процентный (7) и численный гамма процентный ресурсы (10) близки по значениям, относительная погрешность по (11) равна 1,12%.

Эти результаты тестирования позволяют доверять численным моделям (8)–(10).

На рис. 1 приведена гистограмма частот наработки, она хорошо напоминает треугольное распределение, что подтверждает предыдущий вывод.

В табл. 2 приведены результаты вычислений для второго случая, когда учитывается

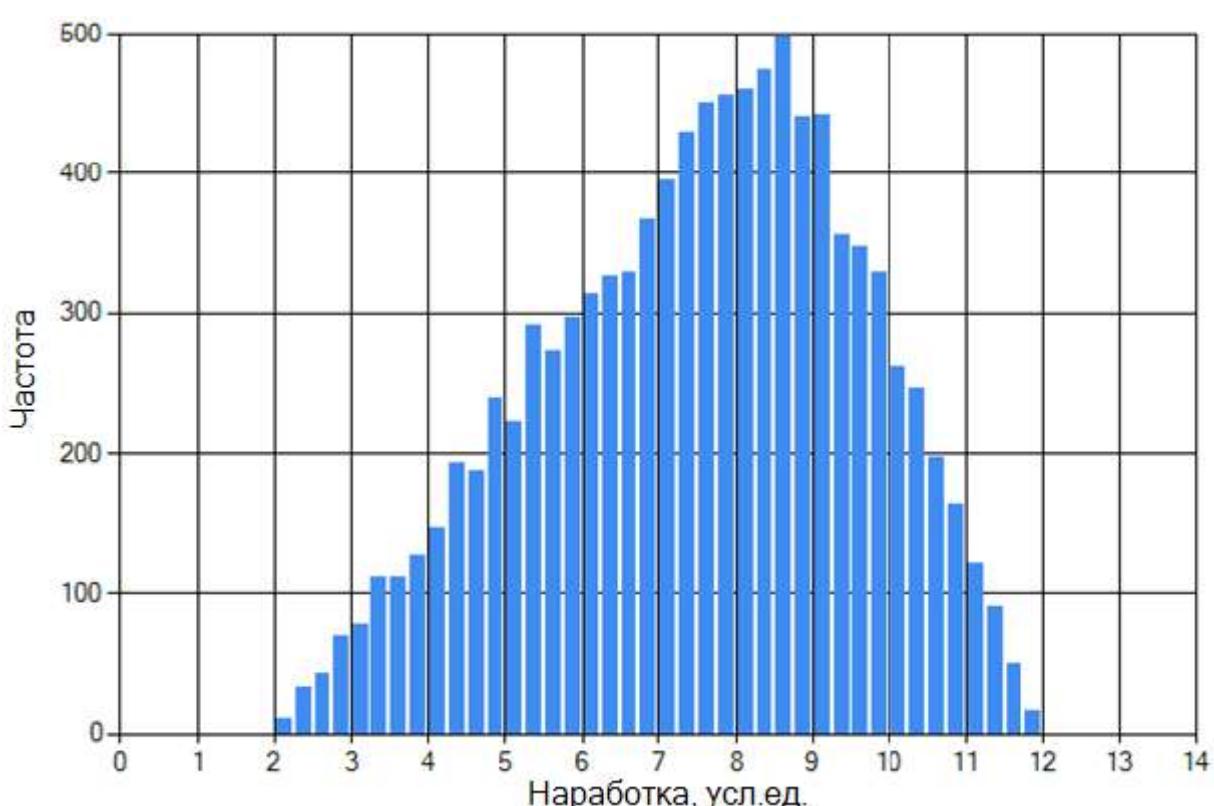


Рис. 1. Гистограмма частот наработки, первый случай

Fig. 1. Operating time frequencies bar graph, first case

неопределенность среднего значения наработки. Исследование проведено при таких дополнительных исходных данных:  $m_1 = 6,5$ ;  $m_2 = 8,5$ . В этом случае параметр  $c$  в соответствии с (2) меняется в диапазоне 5,5–11,5.

При этих данных исследуются два варианта значений параметров: а)  $p = q = 1$ ; б)  $p = q = 4$ .

**Табл. 2.** Результаты вычислений для второго случая  
**Table 2.** Calculation results for the second case

№	$\tilde{x}$	$x_1$	$x_2$
а	7,50635	7,46346	7,54923
б	7,47317	7,43084	7,51422
№	$\bar{x}_r$	$x_r (\gamma)$	$\Delta x_\gamma, \%$
а	7,50453	4,44731	2,24
б	7,47383	4,51429	0,77

Из табл. 2 видно, что полученные численные значения средней наработки (9) с учетом неопределенности для обоих вариантов значений параметров попадают в доверительный интервал (5). Численное среднее значение для варианта: а попадает в доверительный интервал варианта б и наоборот (доверительные интервалы пересекаются). Следовательно, оценки средних значений для обоих вариантов статистически неразличимы.

Гамма процентный ресурс по первому варианту отличается от аналитического значе-

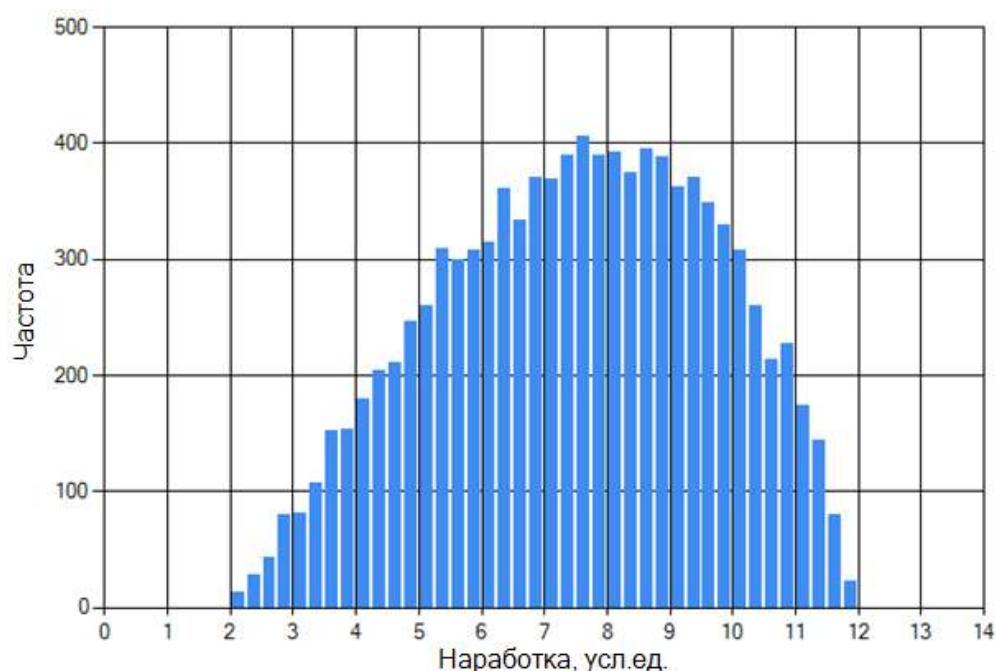
ния  $x_\gamma$  на 2,24 %. В абсолютных значениях из-за неопределенности среднего значения гамма процентный ресурс снизился на 5,1 млн ткм (1 усл. ед. равна 50 млн ткм). Этот факт надо учитывать в процессе принятия управленческих решений при обслуживании рельсовых скреплений железнодорожного пути.

На рис. 2 приведена гистограмма частот наработки для варианта а, которая по значениям частот отличается от треугольного распределения (см. рис. 1). На рис. 1 частоты достигают значений 500, а на рис. 2 – 400. В связи с этим, вершина гистограммы на рис. 2 менее заостренная.

### Заключение

С применением созданного программно-математического обеспечения, использующего метод Монте-Карло, проведено исследование показателей надежности рельсовых скреплений железнодорожного пути. Математическая модель наработки – трехпараметрическое треугольное распределение, параметры которого определяют эксперты. В результате исследования выявлено:

1. Неопределенность среднего значения в исходных данных статистически не влияет на оценки средней наработки, полученные в результате моделирования (они оказались статистически не различимыми);



**Рис. 2.** Гистограмма частот наработки, второй случай  
**Fig. 2.** Operating time frequencies bar graph, second case

2. гамма процентный ресурс при моделировании отличается от аналитического значения на 2,24 %. В абсолютных значениях из-за неопределенности среднего значения наработки гамма процентный ресурс снизился на 5,1

млн ткм (1 усл. ед. – 50 млн ткм). Этот факт нужно учесть при принятии управленческих решений при обслуживании рельсовых скреплений железнодорожного пути.

### Список литературы

1. Кузнецов В.В. Мониторинг работы скрепления АРС // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 8. С. 18–23.
2. Krakovskiy Yu.M., Davaadorzh, Batbaatar. Nechetkii chislennyi veroyatnostnyi analiz dlya otsenki pokazatelei nadezhnosti rel'sovykh skreplenii // Mir Transporta. 2017. T. 15. № 3 (70). С. 30–39.
3. Maksimtsev S.V., Nachigin V.A., Arkhipenko Yu.A. Skrepleniya kak osnovnoi element stabil'nosti verkhnego stroeniya puti // Pуть и путевое хозяйство. 2016. № 6. С. 8–12.
4. Petrov A.V., Savin A.V., Lebedev A.V. Rel'sovye skrepleniya besballastovykh konstruktsii puti na eksperimental'nom koltse OAO «VNIIZHT» // Pуть и путевое хозяйство. 2015. № 12. С. 2–5.
5. Krakovskiy Yu.M., Kargapol'tsev S.K., Nachigin V.A. Modelirovaniye perevozochnogo protsessa zheleznodorozhnym transportom: analiz, prognozirovaniye, riski. SPb. : LITEO, 2018. 240 c.
6. Antipov A.G., Markov A.A. Novye vozmozhnosti magnitodinamicheskogo metoda kontrolya rel'sov // Pуть и путевое хозяйство. 2016. № 8. С. 27–32.
7. Ashtiz E.S. Razvitiye sistemy monitoringa puti // Pуть и путевое хозяйство. 2016. № 4. С. 30–32.
8. Gardeley L.B. i dr. Kompleksnaya otsenka sostoyaniya rel'sov sovremennymi sredstvami defektoskopii // Pуть и путевое хозяйство. 2016. № 6. С. 7–8.
9. Igonykin C.N. O metodakh statisticheskogo analiza sostoyaniya rel'sovoy kol'i // Pуть и путевое хозяйство. 2015. № 9. С. 29–31.
10. Biryuzov V.P. Ob osnovnykh napravleniyakh razvitiya sistem diagnostiki i monitoringa putevogo khozyaistva do 2025 g. // Pуть и путевое хозяйство. 2016. № 4. С. 4–8.
11. Krakovskiy Yu.M., Nachigin V.A., Nachigin A.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya rel'sov po dannym monitoringa puti // Vestnik VNIIZHT. 2012. № 5. С. 40–43.
12. Osmannin A.T., Mekhedor M.I., Mednikov D.V. Obespechenie interoperabil'nosti perevozok // Zheleznodorozhnyy transport. 2019. № 7. С. 11–17.
13. Kozlov P.A. Kolokol'nikov B.C. Raschet i optimizatsiya poligonov zheleznodorozhnogo transporta // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2017. № 3 (67). С. 96–101.
14. Rogenberg E.H., Anoskin V.B. Perspektivy rosta propusknoi sposobnosti участков // Zheleznodorozhnyy transport. 2020. № 3. С. 4–7.
15. Sotnikov E.A., Mekhedor M.I. Xolodnyak P.S. Intensifikasiya rosta zagrivennykh napravlenii seti zheleznykh dorog // Zheleznodorozhnyy transport. 2020. № 3. С. 11–14.
16. Kovalev I.A., Kolokol'nikov B.C. Vliyanie отказov tekhnicheskikh sredstv na vypolnenie grafika dvizheniya poezdov // Transport Urala. 2014. № 2 (41). С. 54–57.
17. Albaixari D., Albaixari B. C# 7.0. Sправочник : polnoe opisanie yazyka. SPb. : Al'fa-kniga, 2018. 1024 c.
18. Troelsen E., Djepik F. Yazyk programmirovaniya C# 7 i platformy .NET i .NET Core. M. ; SPb. : Dialektika, 2018. 1328 c.

### References

1. Kuznetsov V.V. Monitoring raboty skrepleniya ARS [Monitoring of the work of fastening the ARF]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2015, no 8, pp. 18–23.
2. Krakovskiy Yu.M., Davaadorzh, Batbaatar. Nechetkii chislennyi veroyatnostnyi analiz dlya otsenki pokazatelei nadezhnosti rel'sovykh skreplenii [Fuzzy numerical probabilistic analysis for assessing the reliability of rail fasteners]. *Mir transporta* [The World of Transport]. 2017, vol. 15, no 3(70), pp. 30–39.
3. Maksimtsev S.V., Nachigin V.A., Arkhipenko Yu.A. Skrepleniya kak osnovnoi element stabil'nosti verkhnego stroeniya puti [Bond as the main element of the stability of top structure of path]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2016, no 6, pp. 8–12.
4. Petrov A.V., Savin A.V., Lebedev A.V. Rel'sovye skrepleniya besballastovykh konstruktsii puti na eksperimental'nom koltse OAO «VNIIZHT» [Rail fastening of the ballastless designs of the track on the experimental polygon of JSC «VNIIZHT»]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2015, no 12, pp. 2–5.
5. Krakovskiy Yu.M., Kargapol'tsev S.K., Nachigin V.A. Modelirovaniye perevozochnogo protsessa zheleznodorozhnym transportom: analiz, prognozirovaniye, riski [Modeling of the transport process by rail: analysis, forecasting, risk]. Saint Petersburg: LITEO Publ., 2018. 240 p.
6. Antipov A.G., Markov A.A. Novye vozmozhnosti magnitodinamicheskogo metoda kontrolya rel'sov [New possibilities of the magnetodynamic method of rail control]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2016, no 8, pp. 27–32.
7. Ashtiz E.S. Razvitiye sistemy monitoringa puti [Development of the track monitoring system]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2016, no 4, pp. 30–32.

8. Gardelei L.V. et al. Kompleksnaya otsenka sostoyaniya rel'sov sovremennymi sredstvami defektoskopii [Comprehensive assessment of the condition of rails by modern means of flaw detection]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2016, no 6, pp. 7-8.
9. Igonkin S.N. O metodakh statisticheskogo analiza sostoyaniya rel'sovoi kolei [On methods of statistical analysis of the state of the rail track]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2015, no 9, pp. 29-31.
10. Biryuzov V.P. Ob osnovnykh napravleniyakh razvitiya sistem diagnostiki i monitoringa putevogo khozyaistva do 2025 g. [On the main directions of development of diagnostic and monitoring systems of the track economy until 2025]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2016, no 4, pp. 4-8.
11. Krakovskii 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 VNIZHT* [Bulletin of VNIZHT]. 2012, no 5, pp. 40-43.
12. Osminin A.T., Mekhedov M.I., Mednikov D.V. Obespechenie interoperabil'nosti perevozok [Ensuring the interoperability of transportation]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport]. 2019, no 7, pp. 11-17.
13. Kozlov P.A., Kolokolnikov V.S. Raschet i optimizatsiya poligonov zheleznodorozhного 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.
14. Rosenberg E.N., Anoshkin V.V. Perspektivny rosta propusknoi sposobnosti uchastkov [Growth prospects of the capacity of sites]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport]. 2020, no 3, pp. 4-7.
15. Sotnikov E.A., Mekhedov M.I., Holodnyak P.S. Intensifikatsiya rosta zagruzhennykh napravlenii seti zheleznnykh dorog [Intensification of the growth of the busiest lines of a network of Railways]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport]. 2020, no 3, pp. 11-14.
16. Kovalev I.A., Kolokol'nikov V.S. Vliyanie otkazov tekhnicheskikh sredstv na vypolnenie grafika dvizheniya poezdov [The impact of failures of technical means on the implementation of the train schedule]. *Transpot Urala* [Transport of the Urals]. 2014, no 2, (41), pp. 54-57.
17. Albahari D., Albahari B. C# 7.0. Spravochnik. Polnoe opisanie yazyka [C# 7.0 in a Nutshell]. Saint Petersburg: Alfa-book Publ., 2018. 1024 p.
18. Troelsen A., Japikse F. Yazyk programmirovaniya C# 7 i platformy .NET i .NET Core [Pro C# 7 with .NET and .NET Core]. Moscow, Saint Petersburg: Dialektika Publ., 2018. 1328 p.

### Информация об авторах

**Краковский Юрий Мечеславович**, д-р. техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru

**Беляков Вячеслав Олегович**, аспирант кафедры информатики и математического моделирования, Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, г. Иркутск e-mail: surelok1@yandex.ru

**Начигин Владимир Александрович**, канд. техн. наук, начальник инновационно-технологического центра развития Восточного полигона, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: nachiginv@yandex.ru

### Information about the authors

**Yuriii. M. Krakovskii**, Doctor of Engineering Science, Professor, Full Professor of the Department «Information Systems and Information Security», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru

**Vyacheslav O. Belyakov**, Ph.D student of the Department «Computer Science and Mathematical Modeling», Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevskii, Irkutsk, e-mail: surelok1@yandex.ru

**Vladimir A. Nachigin**, Ph.D. in Engineering Science, Head of the Innovation and Technological Development Center of the Eastern Polygon, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: nachiginv@yandex.ru

## О взаимодействии пути и подвижного состава на участках скоростного движения в зависимости от очертания профилей рельсов и колес

А. Ю. Абдурашитов<sup>1</sup>, Ю. Н. Юркова<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре – филиал ОАО «Российские железные дороги», г. Москва, Российской Федерации

<sup>2</sup>Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российской Федерации

✉ y.lenin@bk.ru

### Резюме

В статье представлены результаты анализа проблемных вопросов по взаимодействию в системе «колесо – рельс». Рассмотрены основные виды контактов колес и рельсов, в частности одноточечный и конформный. Отмечается, что колесам и рельсам такой профиль можно придавать в процессе текущего содержания, а рельсы могут профилироваться сразу после укладки в путь. Приводятся данные по измерению профилей рельсов на участках скоростного движения и колес поездов «Сапсан» и «Ласточка», а также расчетов по определению сил и напряжений при взаимодействии подвижного состава и пути на выбранных участках скоростного движения (Горьковская железная дорога) и высокоскоростного движения (Октябрьская железная дорога). Оценивается влияние очертания поперечного профиля рельсов и профиля новых и изношенных колес поездов «Сапсан» и «Ласточка» на уровень их взаимодействия, при этом принимается во внимание подуклонка рельсов и ширина колеи. На основании результатов моделирования проводится анализ сил и напряжений в контакте «колесо – рельс» в зависимости от очертания поверхности катания колес и рельсов. Приводятся значения эквивалентной конусности при взаимодействии в системе «колесо – рельс» на участках высокоскоростного и скоростного движения. На основании полученных результатов сделаны выводы о рекомендуемых скоростях движения на исследуемых участках пути. Показано, что результаты моделирования послужат базой для разработки плана мероприятий по оптимизации очертания профилей колес и рельсов и позволят внести корректировки в систему их технического обслуживания.

### Ключевые слова

скоростное движение, очертание профилей рельсов, взаимодействие пути и подвижного состава, износ рельсов, прокат колес, контактное давление, вертикальные силы, техническое обслуживание рельсов и колес

### Для цитирования

Абдурашитов А. Ю. О взаимодействии пути и подвижного состава на участках скоростного движения в зависимости от очертания профилей рельсов и колес / А. Ю. Абдурашитов, Ю. Н. Юркова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 170–177. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).170-177

### Информация о статье

поступила в редакцию: 12.01.2022 г.; поступила после рецензирования: 18.01.2022 г.; принята к публикации: 19.01.2022 г.

## On the interaction of track and rolling stock on high-speed sections depending on the shape of rail and wheel profiles

А. Yu. Abdurashitov<sup>1</sup>, Yu. N. Yurkova<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Infrastructure Design Bureau – branch of JSC «Russian Railways», Moscow, the Russian Federation

<sup>2</sup>Russian University of transport (MIET), Moscow, the Russian Federation

✉ y.lenin@bk.ru

### Abstract

The results of the analysis of problematic issues in the «wheel-rail» system interaction are presented. The main types of wheel and rail contacts are considered, including single-point and conformal ones. It is noted that such a profile can be given to wheels and rails in the process of current maintenance, while rails can be profiled immediately after having been laid in the track. The measurement data of rail profiles on the sections of high-speed traffic and wheels of the «Sapsan» and «Lastochka» trains are presented as well as calculations for determining forces and stresses during the interaction of rolling stock and track on selected sections of a speed traffic (Gorkiy railway) and a high-speed traffic (Oktyabrskaya railway). The influence of the outline of the transverse profile of rails and the profile of new and worn wheels of the «Sapsan» and «Lastochka» trains on the level of their interaction is estimated, while taking into account the slope of the rails and the width of the track. Based on the simulation results, the forces and stresses in the wheel-rail contact patch are evaluated depending on the shape of the rolling surface of the wheels and rails. The results of the evaluation of the equivalent taper during the interaction in the «wheel-rail» system on the sections of high-speed and speed traffic are presented. Based on the results obtained, conclusions are drawn about the recom-

mended speeds of movement on the surveyed sections of the track. It is shown that the simulation results may serve as a basis for the development of an action plan to optimize the shape of the profiles of wheels and rails and allowing adjustments to be made to their maintenance system.

### Keywords

high-speed traffic, the outline of the profile rails, interaction of track and rolling stock, the wear of the rails, wheel rental, contact pressure, vertical force, maintenance of rails and wheels

### For citation

Abdurashitov A. Yu., Yurkova Yu. N. O vzaimodeystvii puti i podvizhnogo sostava na uchastkakh skorostnogo dvizheniya v zavisimosti ot ochertaniya profilei rel'sov i koles [On the interaction of track and rolling stock on high-speed sections depending on the shape of rail and wheel profiles]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 170–177. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).170-177

### Article Info

Received: 12.01.2022; revised: 18.01.2022; accepted: 19.01.2022.

## Введение

В рамках статьи рассматриваются оценка взаимодействия в системе «колесо – рельс» на участках скоростного движения, а также влияние на параметры взаимодействия пути и подвижного состава различных факторов (подуклонка рельсов, ширина колеи, очертание профилей колес и рельсов).

Для улучшения взаимодействия пути и подвижного состава следует предпринять меры по определению фактически существующих условий эксплуатации, исходя из которых можно разработать нормы по текущему содержанию, обслуживанию и ремонту технических средств железнодорожного транспорта с учетом рентабельности на длительную перспективу.

Анализ отечественного и мирового опыта позволяет сделать вывод о том, что очертание профилей колеса и рельса – наиболее важный фактор, который влияет на эффективность при взаимодействии пути и подвижного состава. Также он действует на интенсивность изнашивания и контактно-усталостные повреждения колес и рельсов, на срок их службы и безопасность движения [1–7].

В системе «колесо – рельс» основной проблемой является уменьшение уровня их взаимодействия, в том числе снижение уровня трения. Однако для обеспечения движения силы тяги требуется, чтобы значения силы трения были достаточными.

Высокие требования предъявляются к материалам конструкции по прочности, износостойкости и контактной выносливости.

Величина неровностей на поверхности рельсов и колес не должна препятствовать реализации высоких скоростей движения, особенно актуально это при скоростях выше 200 км/ч.

Как российские, так и зарубежные специалисты большое внимание уделяли взаимодействию в системе «колесо-рельс» [8–11].

При движении подвижного состава по рельсовому пути возможны три основных вида контакта колеса и рельса:

1. Поверхность катания колеса контактирует с рельсом в центральной области его головки. Такой вид контакта характерен для прямых участков пути и кривых очень большого радиуса.

2. Одно из колес контактирует с возвышенным наружным рельсом в кривой в переходной зоне поверхности катания (поблизости от рабочей выкружки, но не непосредственно на ней), другое колесо контактирует с внутренним рельсом в центральной области его головки. Такой вид контакта характерен для достаточно пологих кривых.

3. Одно из колес контактирует с возвышенным наружным рельсом в кривой на его рабочей выкружке, другое колесо контактирует с внутренним рельсом в центральной области его головки. Такой контакт характерен для кривых малого радиуса.

Фактические условия контакта колеса и рельса в эксплуатации могут стать значительно разнообразнее и значительно сложнее. Для того чтобы улучшить характер этого взаимодействия, требуется оценка реальных условий эксплуатации и на этом основании разработка нормативов по техническому обслуживанию (текущему содержанию и ремонту) путевой инфраструктуры с учетом стоимости ее жизненного цикла.

Ухудшение контактирования колес и рельсов вследствие износа рельсов, проката колес, смешения дорожки контакта приводит к

уменьшению их срока службы. Управлять этим процессом возможно за счет проведения периодического шлифования рельсов и обточки колес. Это позволяет существенно отдалить образование контактно-усталостных дефектов как рельсов, так и колес.

Необходимо разработать взаимоувязанные профили колес и рельсов с учетом классификации линии (скоростное, тяжеловесное движение, совмещенная эксплуатация и т.д.).

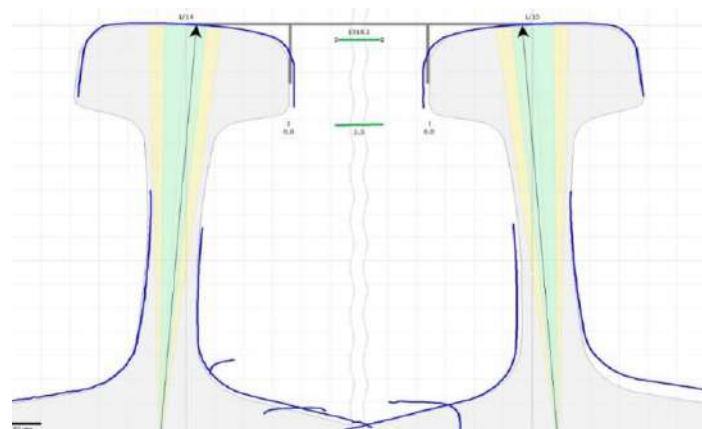
По результатам проведенных аналитических расчетов получены значения сил и напряжений при взаимодействии подвижного состава и железнодорожного пути реального очертания с учетом отклонений показателей подуклонки рельсов (наклона поверхности катания головки рельсов от номинального показателя (1/12 и 1/60) при различных скреплениях (клеммно-болтовое, железобетонное рельсовое и анкерное рельсовое), участков пути в прямых и разного радиуса кривых участках, с учетом воз-

ышения рельсов и износа головки рельса). По итогам анализа результатов эксперимента и натурных измерений (рис. 1), получены величины допустимых при эксплуатации параметров подуклонки, а также наклона поверхности катания головки рельсов. По результатам математического моделирования взаимодействия экипажа и пути получены значения максимальных напряжений в контакте «колесо – рельс» при изменении подуклонки (рис.2).

При анализе работы узла скреплений шпал на линии Нижний Новгород – Москва проводилось исследование подуклонки рельсов.

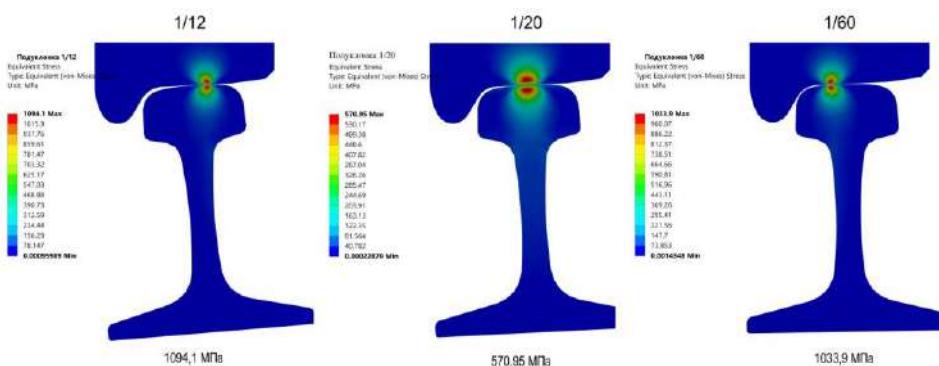
По полученным результатам установлено, что причинами отступлений подуклонки рельсов в пути от нормативных требований являлись:

– отступление подуклонки подрельсовых площадок железобетонных шпал в процессе производства от требований Норм безопасности на железнодорожном транспорте 017-93;



**Рис. 1.** Зависимость подуклонки рельсов от ширины колеи на участке скоростного движения  
(Подуклонка левого рельса 1/14, правого – 1/15, ширина колеи – 1°518,2 мм)

**Fig. 1.** Dependence of the rail canting on the track width in the section of speed traffic  
(The slope of the left rail is 1/14, the right one is 1/15, the track width is 1°518.2 mm)



**Рис. 2.** Значения максимальных напряжений, МПа при изменении подуклонки  
**Fig. 2.** Values of maximum stresses, MPa when changing the canting



Рис.3. Измерение профиля колеса скоростного поезда «Ласточка»  
Fig. 3. Measurement of the wheel profile of «Lastochka» high-speed train

Замеры колесных пар электропоезда ТУ-18										ЭС2Г		061		Заказ-номер: D1096307															
														пробег на момент замера (км)															
														523 694															
Секция колесных пар	Номер	высота гребня	прокат	толщина гребня	параметр крутизны гребня	Уширение обода	диаметр обода	Разница диаметров	Допуски по разнице диаметров (мм)	на к.п.	на тележке	на вагоне	на к.п.	на тележке	на вагоне	на к.п.	на тележке	на вагоне	на к.п.	на тележке	на вагоне	на к.п.	на тележке	на вагоне					
левая сторона	правая сторона	левая сторона	правая сторона	левая сторона	правая сторона	левая сторона	правая сторона	левая сторона	на к.п.	на тележке	на вагоне	на к.п.	на тележке	на вагоне	на к.п.	на тележке	на вагоне	мот	не мот	мот	не мот	мот	не мот	мот	не мот				
01	1 00173	32,9	33,3	2,9	3,3	28,3	28,5	6,5	6,6	0,6	0,7	867,1	866,6	0,5	2,6	4,5				1,2	5,0	15,0	5,0	30,0					
	2 00523	32,9	33,0	2,9	3,0	30,9	29,5	8,4	7,3	0,7	0,7	869,2	868,8	0,4															
	3 00387	32,6	32,8	2,6	2,8	29,5	29,3	7,6	7,4	0,5	0,3	871,1	870,6	0,5	1,0														
	4 00377	32,6	32,9	2,6	2,9	30,3	28,6	8,6	8,6	0,4	0,4	870,8	870,1	0,7															
02	1 00462	31,5	31,8	1,5	1,8	29,3	30,1	6,9	7,4	0,4	0,4	918,4	917,7	0,7	0,8	1,1													
	2 00208	31,4	31,6	1,4	1,6	30,6	30,2	8,2	7,8	0,3	0,4	918,5	918,1	0,4															
	3 00158	31,1	31,4	1,1	1,4	29,6	30,3	7,2	7,6	0,3	0,2	918,6	918,3	0,5	0,5														
	4 00785	31,2	31,3	1,2	1,3	29,9	29,6	7,3	7,6	0,3	0,4	918,6	918,4	0,2															
03	1 00375	30,5	30,2	0,5	0,2	28,9	29,0	8,2	7,6	-0,5	-0,5	893,2	893,4	0,2	5,6	15,0													
	2 00408	30,1	30,1	0,7	1,1	29,8	29,9	8,0	7,4	-0,5	-0,5	898,6	898,3	0,9															
	3 00582	30,6	31,0	0,6	1,0	29,0	29,6	8,5	7,4	-0,5	-0,5	887,6	887,3	0,7															
	4 00451	30,7	31,0	0,7	1,0	29,3	29,5	6,6	6,9	-0,5	-0,5	884,5	883,8	0,7	11,4														
04	1 03149	30,2	30,2	0,2	0,2	30,8	30,6	8,6	8,4	0,3	0,2	911,6	911,3	0,3															
	2 02107	31,0	31,1	1,0	1,1	30,1	28,9	7,5	6,4	0,3	0,3	919,5	919,1	0,4	8,2														
	3 02121	31,2	31,0	1,2	1,0	29,6	30,1	7,3	7,7	0,2	0,3	918,5	918,7	0,2	8,6	4,2													
	4 02104	31,1	30,8	1,1	0,8	28,7	28,6	6,2	6,4	0,3	0,2	919,1	919,9	0,8	1,4														
05	1 00224	32,3	32,4	2,3	2,4	28,9	29,6	7,2	7,0	0,4	0,5	873,7	873,3	0,4	0,9														
	2 00119	31,2	31,2	1,2	1,2	29,9	29,0	8,0	7,2	0,4	0,4	874,2	874,2	0,0															
	3 00521	32,0	31,7	2,0	1,7	29,4	31,0	7,5	8,4	0,3	0,3	877,2	877,5	0,3	0,7														
	4 00527	32,3	32,1	2,3	2,1	28,5	29,4	6,7	7,5	0,1	0,4	876,8	876,9	0,1															
ДОПУСКИ НА КОЛЕСНЫЕ ПАРЫ																													
Высота гребня																													
Мин																													
Макс																													
Параметры на составе																													
Наиб выс гребня																													
Наиб прокат																													
минимум гребня																													
максимум гребня																													
наим крут./на																													
наим крут./на																													
Уширение обода																													
Мин. диаметр																													

Рис. 4. Результаты измерений профилей колес скоростных поездов «Ласточка»

Fig. 4. The results of measuring the profiles of the wheels of «Lastochka» high-speed train

- разнонаправленная скрученность рельсов в зоне сварных рельсовых стыков;
  - образование остаточных деформаций прокладок-амортизаторов от действия поездной нагрузки, которое приводит к разной толщине прокладок и изменению подуклонки;
  - разница моментов затяжки внутренних и наружных клеммных болтов, определяющая различия в продольных усилиях поджатия рельсов к шпалам и изменение подуклонки;
  - изменение подуклонки рельсов от поездной нагрузки за счет упругости скреплений.
- На рис. 3 показаны очертания профилей колес поезда, а на рис. 4 – результаты измерений.

Для снижения износа в современной практике пришли к созданию профилей, у которых поверхность катания обладает не постоянными значениями конусности, а выполняется чередованием окружностей, которые имитируют различную степень износа, близкую к возникающей в период приработки колес [12–15].

Интенсивность износа у рельсов и колес с таким профилем существенно ниже, чем у стандартных.

Рассмотрим основные виды контактов колес и рельсов с учетом исследований [16–18].

Непосредственно на площадке контакта металл колеса и рельса находится под высоким

давлением, действующим со всех направлений, так как контактное давление поддерживается реакциями со стороны окружающего материала.

Интенсивный одноточечный контакт основания гребня колеса и рабочей выкружки рельса приводит к возникновению наклонных параллельных трещин или выкрашиванию металла головки рельса.

Интенсивный «выпуклый» контакт наиболее высокой точки профиля рельса и колеса может вызвать пластическое течение и выкрашивание металла в центральной части поверхности катания рельса и / или колеса.

Поперечное проскальзывание колеса относительно рельса в кривых имеет место при неудовлетворительном вписывании ходовой части подвижного состава в рельсовую колею. Силы, действующие поперек площадки контакта в результате проскальзывания или микротрения, вызывают деформацию элементов металла под площадкой контакта. При этом нарушается благоприятная картина давлений и напряжений в элементе, что вызывает течение металла и приводит к неравномерному изнашиванию поверхности катания рельса и деформациям в виде волнообразного износа или большого перемещения металла.

Недостаточный контроль за профилем контактирующих тел приводит к уменьшению размера и изменению формы площадки контакта, что вызывает интенсификацию напряжений, течение металла и возникновение контактно-усталостных повреждений. Наличие дефектов в металле рельса или колеса в зоне интенсивных контактных напряжений усугубляет данные условия.

В случае движения в прямых участках пути контактирование колеса и рельса происходит в основном в средней части на поверхности катания. Расположение зоны контакта в узкой части центральной зоны прежде всего может проявляться в случае сочетания колеса с коническим профилем обода и с профилем рельсов с большой кривизной и в наименьшей степени при колесах с таким же профилированным ободом при так называемых плоских рельсах. Полоса же контакта наиболее явно выражена при стабильном состоянии ширины рельсовой колеи. Следует избегать двухточечного контакта между колесом и рельсом в прямых участках, так как он приводит к контакту по-

верхностей со значительно увеличенной конусностью и неустойчивому движению экипажа.

### Одноточечный контакт

Анализ показал, что одноточечные контакты наносят наиболее ощутимые повреждения как подвижному составу, так и пути. Значительные контактные напряжения, которые имеют место при интенсивном проскальзывании, приводят к усталостным повреждениям рельсов.

И тем не менее одноточечный контакт считается приемлемым для прямых участков пути, так как трудно представить, что имеющие место в данном случае малые углы набегания могут привести к значительному износу и изменению первоначального профиля колеса. В целом такие условия привели бы к уменьшению конусности и повышению степени устойчивости движения подвижного состава в прямых участках пути.

Однако даже при самом благоприятном случае вероятно появление параллельных трещин на поверхности катания головки рельса, а в самом неблагоприятном – разрушение рельса из-за интенсивного продольного проскальзывания, вызывающего течение материала рельса, а также неустойчивости движения подвижного состава, которое выражается в вилянии, в результате чего боковой износ рельсов значительно ускоряется.

Одноточечный контакт появляется прежде всего вследствие:

- неверного расчета очертания профилей колес и рельсов;
- сплющивания поверхности катания головки рельса в процессе эксплуатации;
- чрезмерного неконтролируемого проката поверхности катания колеса.

### Конформный контакт

Конформный контакт возникает по мере эксплуатации при износе рабочей выкружки рельса и гребня колеса вследствие интенсивного гребневого контакта в кривых участках пути. Данный профиль приблизительно одинаков даже при различных условиях гребневого контакта.

Про конформный контакт можно отметить, что относительное проскальзывание приводит к увеличению зоны контакта, при этом удельное давление уменьшается, но имеет место течение материала.

Профиля рельсов и колес, изношенных до соответствующей конформному контакту конфигураций, могут успешно ее сохранять и показывать достаточно хорошую работоспособность по усталостной долговечности.

Профиль этого типа имеет ряд преимуществ, которые заключаются в следующем:

- сохраняется конфигурация;
- усталость рельса находится под контролем;
- конусность колес имеет нейтральный характер, т. е. они не приобретают большую конусность в отличие от одноточечного контакта.

Таким образом, можно рекомендовать, чтобы профили колес и рельсов были конформными. И колесам, и рельсам такой профиль следует придавать в процессе текущего обслуживания – рельсы могут шлифоваться сразу после укладки в путь.

При разработке конформного профиля важно учесть следующие моменты:

- радиусы и длины дуг профиля;
- контакт по касательной при слиянии этого профиля с профилем поверхности катания колеса, чтобы гарантировать минимальную возможность двухточечного контакта между поверхностью катания и гребнем;
- допустима некоторая свобода при выборе угла наклона гребня для соответствия существующим стандартам текущего содержания;
- радиусы рабочей грани рельса должны следовать профилю гребня и плавно переходить в профиль поверхности катания головки рельса, избегая возникновения двухточечного контакта между рельсом и колесом.

Проведено моделирование системы «колесо – рельс» для различных сочетаний профилей:

- рельсы и колеса неизношенные;
- рельс изношенный – колесо неизношенное;
- колесо изношенное – рельс неизношенный;
- колесо изношенное – рельс изношенный.

Полученные результаты послужат основой для разработки плана мероприятий по оптимизации профилей «колесо – рельс» (рис. 5).

Для реальных условий эксплуатации проведена оценка показателей эквивалентной конусности при сочетании новых и изношенных профилей колес «Р8 Сапсан» и рельсов типа Р65 (табл.).

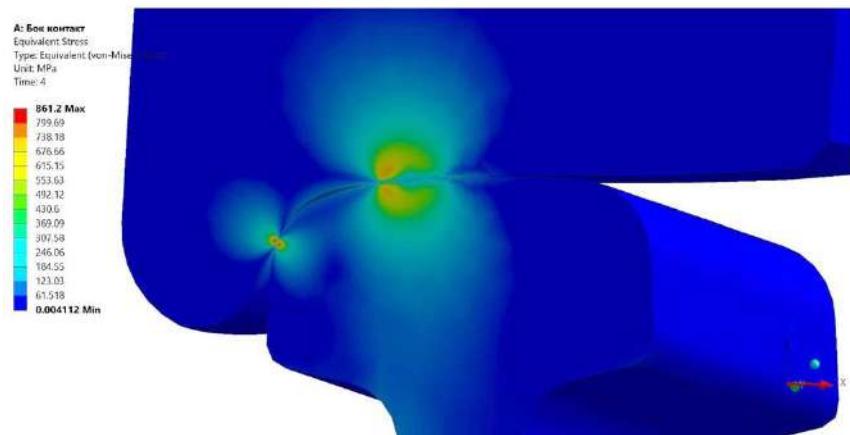
Таким образом, контактирование изношенного колеса «Р8 Сапсан» с новым рельсом Р65 недопустимо в связи с рисками возникновения дополнительных колебаний и раскачиваний экипажа.

### Заключение

Главный фактор, определяющий величину напряжений в контакте «колесо-рельс» – радиусы поверхности катания рельсов и колес: чем больше отклонение этих радиусов от проектных значений, тем больше увеличиваются напряжения.

Определены допустимые при эксплуатации на участке скоростного движения параметры подуклонки и наклона поверхности катания рельсов.

Для оптимизации профилей колеса и рельса по контактным напряжениям даются



**Рис.5.**Результаты моделирования контактирования вагонного колеса поезда «Ласточка» и рельса на участке скоростного движения

**Fig. 5.**The results of modeling the contact of the «Lastochka» train car wheel and the rail in the section of high-speed traffic

Значения эквивалентной конусности сочетаний новых и изношенных профилей колес  
«Р8 Сапсан» и рельса типа Р65Values of the equivalent taper of combinations of new and worn profiles of wheels  
«R8 Sapsan» and rail type R65

Характеристика Characteristic	Новое колесо «Р8 Сапсан» – новый рельс Р65 New wheel «R8 Sapsan» – new rail R65	Новое колесо «Р8 Сапсан» – изношенный рельс Р65 New wheel «R8 Sapsan» – worn rail	Изношенное колесо «Р8 Сапсан» – новый рельс Р65 Worn wheel «R8 Sapsan» – new rail R65	Изношенное колесо «Р8 Сапсан» – изношенный рельс Р65 Worn wheel «R8 Sapsan» – worn rail R65
Эквивалентная конусность Equivalent taper	0,123	0,125	0,363	0,023
Устойчивое движение со скоростью до 250 км/ч Sustainable motion at the speed of 250 km/h	Обеспечивается provided	Обеспечивается provided	не обеспечивается not provided	Обеспечивается provided

следующие рекомендации:

– не допускать контактных напряжений, значения которых превышают предел прочности рельсового металла на сдвиг;

– за счет своевременной обточки профиля колеса и шлифовки головки рельса распределять точки контакта по поверхностям катания колеса и рельса.

## Список литературы

1. Коган А.Я., Абдураширов А.Ю., Полещук И.В. Дополнительные требования к прямолинейности рельсов в зоне стыков // Железные дороги мира. 2003. № 3. С. 66–71.
2. Коган А.Я., Пейч Ю.Л. Расчет напряженно-деформированного состояния элементов конструкции пути в зоне стыка рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2000. № 2. С. 31–39.
3. Горячева И.Г., Захаров С.М., Коган А.Я. и др. Комплексный подход к прогнозированию работоспособности и ресурса рельсов нового поколения // Бюл. Объедин. ученого совета ОАО «РЖД». 2017. № 5-6. С. 16–26.
4. Погорелов Д.Ю. Компьютерное моделирование динамики технических систем с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» // Вестн. компьютер. и информац. технологий. 2005. № 4. С. 27–34.
5. Оценка эволюции профилей колес железнодорожного экипажа на основе применения трибодинамической модели / С.М. Захаров, И.Г. Горячева, Д.Ю. Погорелов и др. // Тяжёлое машиностроение. 2007. № 3. С. 19–24.
6. Лисицын А.И., Абдураширов А.Ю. О взаимодействии в системе «колесо-рельс» на участках высокоскоростного движения // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 3. С. 2–6.
7. Абдураширов А.Ю. О влиянии особенностей профилей колес и рельсов на их взаимодействие // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 11. С. 2–7.
8. Программный комплекс «Универсальный механизм» // Лаборатория вычислительной механики : сайт. URL: <http://www.umlabs.ru> (Дата обращения: 27.12.2021).
9. Алексин А.Л. Прогнозирование одиночного выхода рельсов, сваренных алюминотермитным способом // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2010. № 2 (23). С. 51–56.
10. Аманова М.В. Оценка суммарного одиночного выхода рельсов при обращении по ним разнотипного подвижного состава // Промышленный транспорт Казахстана. 2012. № 3. С. 14–18.
11. Интенсивность накопления остаточных деформаций пути при воздействии вагонной нагрузки 250 кН/ось. Ленингр. ин-т инж. ж.-д. трансп / С.В. Амелин, Л.С. Блажко, М.П. Смирнов и др. Л. : 1982. Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 30.08.82, № 1797-жд.
12. Бельтюков В.П. Планирование ремонтов пути в условиях интенсивной его эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук. Л., 1990. 275 с.
13. Бельтюков В.П. Разработка методик прогнозирования технического состояния пути, затрат на содержание пути и оптимизация содержания пути по экономическим критериям // Путь XXI века : сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2012. С. 25–32.
14. Бельтюков В.П. Среднесрочное планирование работ по ремонту верхнего строения пути // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 2. С. 23–25.
15. Блажко Л.С. Технико-технологическая оценка усиления конструкции пути на участках обращения подвижного состава с осевыми нагрузками до 300 кН : дис. ... д-ра тех. наук. СПб., 2003. 331 с.
16. Сенникова А.В. Влияние скорости движения поездов на одиночный выход рельсов в пути // Путь XXI века : сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2013. С. 82–84.
17. Куклин С.А. Контактные задачи при качении // Современные проблемы теории машин : материалы II Междунар. заочн. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2014. С. 33–40.
18. Сычев В.П. Методы оценивания железнодорожного пути характеристиками случайных процессов // Наука и техника транспорта. 2007. № 3. С. 84–88.

## References

1. Kogan A.Ya., Abdurashitov A.Yu., Poleshchuk I.V. Dopolnitel'nye trebovaniya k pryamolineinosti rel'sov v zone stykov [Additional requirements for the straightness of rails in the joint zone]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world]. 2003, no 3, pp. 66-71.
2. Kogan A.Ya., Peych Yu.L. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov konstruktsii puti v zone styka rel'sov [Calculation of the stress-strain state of track structural elements in the rail junction zone]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT]. 2000, no 2, pp. 31–39.
3. Goryacheva I.G., Zakharov S.M., Kogan A.Ya., Torskaya E.V., Shur E.A., Abdurashitov A.Yu., Borts A.I., Zagranichek K.L. Kompleksnyi podkhod k prognozirovaniyu rabotosposobnosti i resursa rel'sov novogo pokoleniya [Integrated approach to the prediction of performance and resource rails new generation]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO «RZHD»* [Bulletin of the joint scientific Council of JSC «RZD»]. 2017, no 5-6, pp. 16-26.
4. Pogorelov D.Yu. Komp'yuternoe modelirovaniye dinamiki tekhnicheskikh sistem s ispol'zovaniem programmno-go kompleksa «Universal'nyi mekhanizm» [Computer simulation of the dynamics of technical systems using software package «Universal mechanism»]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii* [Bulletin of Computer and Information Technologies]. 2005, no 4, pp. 27–34.
5. Zakharov S.M., Goryacheva I.G., Pogorelov D.Yu., Yazykov V.N., Zharov I.A., Torskaya E.V., Soshenkov S.N., Prozorov Ya.S. Otsenka evolyutsii profilei koles zheleznodorozhnoy ekipazha na osnove primeneniya tribodinamicheskoi modeli [Evaluation of the evolution of the railway carriage wheel profiles based on the application of the tribodynamic model]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering]. 2007, no 3, pp. 19–24.
6. Lisitsyn A.I., Abdurashitov A.Yu. O vzaimodeystvii v sisteme «koleso – rel's» na uchastkakh vysokoskorostnogo dvizheniya [About interaction in the «wheel-rail» system on high-speed traffic sections]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities]. 2020, no 3, pp. 2-6.
7. Abdurashitov A.Yu. O vliyanii osobennostei profilei koles i rel'sov na ikh vzaimodeystvие [On the influence of the features of the profiles of wheels and rails on their interaction]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities]. 2015, no 11, pp. 2–7.
8. Programmnii kompleks «Universal'nyy mekhanizm» (Elektronnyi resurs) [Software package «Universal mechanism» (Electronic resource)]. Available at: <http://www.umlabs.ru> (Accessed December 27, 2021).
9. Alyokhin A.L. Prognozirovaniye odinochnogo vykhoda rel'sov, svarennykh alyuminotermitnym sposobom [Prediction of a single output of rails welded by the aluminothermic method]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Petersburg Transport University]. 2010, no 2(23), pp. 51–56.
10. Amanova M.V. Otsenka summarnogo odinochnogo vykhoda rel'sov pri obraschenii po nim raznotipnogo podvizhnogo sostava [Evaluation of the total single output of rails when handling different types of rolling stock on them]. *Promyshlennyy transport Kazakhstana* [Industrial transport of Kazakhstan]. 2012, no 3, pp. 14-18.
11. Amelin S.V., Blazhko L.S., Smirnov M.P., Smirnov V.I. Intensivnost' nakopleniya ostatochnykh deformatsii puti pri vozdeistvii vagonnoi nagruzki 250 kN/os' [The intensity of the accumulation of residual deformations of the way when exposed to a wagon load of 250 kN/axle]. Leningrad. in-ting. W.-D. transp. L., 1982. DEP. in TSNIITEI MPS 30.08.82. No 1797-rail.
12. Beltyukov V.P. Planirovaniye remontov puti v usloviyakh intensivnoi ego ekspluatatsii [Planning of track repairs in conditions of intensive operation]. Ph.D's thesis. Leningrad, 1990. 275 p.
13. Beltyukov V.P. Razrabotka metodik prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya puti, zatraty na soderzhanie puti i optimizatsii soderzhaniya puti po ekonomiceskim kriteriyam [Development of methods for forecasting the technical condition of the track, the costs of maintaining the track and optimizing the maintenance of the track according to economic criteria]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Put' XXI veka»* [Proceedings of the scientific and practical conference «The Path of the XXI century】. Saint Petersburg, 2012, pp. 25–32.
14. Beltyukov V.P. Srednesrochnoe planirovaniye rabot po remontu verkhnego stroeniya puti [Mid-term planning of work on the repair of the upper structure of the track]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and path facilities]. 2013, no 2, pp. 23-25.
15. Blazhko L.S. Tekhniko-tehnologicheskaya otsenka usileniya konstruktsii puti na uchastkakh obrashcheniya podvizhnogo sostava s osevymi nagruzkami do 300 kN [Technical and technological assessment of the strengthening of the track structure on the sections of rolling stock circulation with axial loads up to 300 kN]. Doctor's thesis. Saint Petersburg, 2003. 331 p.
16. Sennikova A.V. Vliyanie skorosti dvizheniya poezdov na odinochnyi vykhod rel'sov v puti [The influence of train speed on a single rail exit in the way]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Put' XXI veka»* [Proceedings of international scientific and practical conference «Path of the XXI century】. Saint Petersburg Transport University, 2013, pp. 82-84.
17. Kuklin S.A. Kontaktnye zadachi pri kachenii [Contact problems in rolling]. *Materialy II Mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye problemy teorii mashin»* [Materials of the II International correspondence scientific and practical conference «Modern problems of machine theory»]. Saint Petersburg, 2014, pp. 33-40.
18. Sychev V.P. Metody otsenivaniya zheleznodorozhnoy puti kharakteristikami sluchainykh protsessov [Methods of evaluating the railway track by the characteristics of random processes]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technic of the transport]. 2007, no 3, pp. 84-88.

## Информация об авторах

**Абдурашитов Анатолий Юрьевич**, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела рельсов, проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре – филиал ОАО «РЖД», г. Москва, e-mail: abdran@yandex.ru

**Юркова Юлия Николаевна**, аспирант кафедры пути и путевого хозяйства, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, e-mail: y.lenin@bk.ru

## Information about the authors

**Anatolii Yu. Abdurashitov**, Ph.D in Engineering Science, Associate Professor, head of rail department, Infrastructure Design Bureau – branch of JSC «Russian Railways», Moscow, e-mail: abdran@yandex.ru

**Yuliya N. Yurkova**, Ph.D. Student of Department «Path and path facilities», Russian University of transport (MIET), Moscow, e-mail: y.lenin@bk.ru

## Разработка модели подготовки сотрудников сферы транспорта к работе в нестандартных ситуациях

П. С. Бурдяк✉

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

✉ burdyakps@mail.ru

### Резюме

В статье представлена модель подготовки и сбора информации для обучения сотрудников сферы транспорта навыкам работы в нестандартных ситуациях. Такие ситуации характеризуются новой, неизвестной информацией и условиями работы. Сложность подготовки специалистов к такой работе заключается в подборе исходных данных, которые не должны содержаться в опыте обучаемого. Существующие подходы в подготовке специалистов, как правило, ограничиваются выработкой навыков действий по инструкции, по готовому алгоритму. Однако при возникновении неожиданных, неизвестных факторов, выученный порядок действий может быть нарушен за счет влияния особенностей типов реагирования обучаемого на стрессор. Такие реакции приводят к ошибкам в действиях, замедленным реакциям или наоборот поспешно принятым решениям. Базой для построения модели подготовки является система подготовки летного состава и спецконтингента, задействованного на работах в сложных и опасных условиях. Предлагаемая модель позволяет выявить опыт обучаемого до начала процесса обучения, подготовить обучаемого и выбрать индивидуальный маршрут прохождения учебных заданий, созданных из постоянно пополняющегося списка учебных ситуаций. Сложность подбора учебных ситуаций вызвана особенностью работы групп специалистов, межличностных связей и других факторов, которые могут препятствовать восприятию учебных ситуаций, как новых и незнакомых. Созданная модель позволяет упростить сбор информации о существующем опыте обучаемого и подобрать необходимые задания. Результатом работы с моделью подготовки следует считать расширение оперативного поля внимания обучаемого и выработку опыта конструктивного реагирования в ситуациях, которые характеризуются как нестандартные.

### Ключевые слова

нестандартная ситуация, стрессовая ситуация, обучение специалистов, типы реагирования, базовые сценарии

### Для цитирования

Бурдяк П. С. Разработка модели подготовки работников транспорта к работе в нестандартных ситуациях / П. С. Бурдяк // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 178–186. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).178-186

### Информация о статье

поступила в редакцию: 09.03.2022, поступила после рецензирования: 25.03.2022, принята к публикации: 25.03.2022

## Development of a model for training transport workers to function in non-standard situations

P. S. Burdyak✉

Siberian Transport University, Novosibirsk, the Russian Federation

✉ burdyakps@mail.ru

### Abstract

The article presents a model for preparing and collecting information needed in the transport workers training to function in non-standard situations. Such situations are characterized by new, unknown information and working conditions. The complexity of training specialists for such work lies in the selection of initial data that should not be contained in the existing experience of a trainee. The existing approaches to training specialists are limited to developing skills of actions according to instructions and ready-made algorithm. However, under the influence of unexpected, unknown factors, the learned order of actions can be disrupted due to the influence of the specific types of the trainee's response to the stressor. Such reactions result in mistakes in actions, slow reactions or, conversely, in hasty actions. The basis for building a training model is a system for training flight crews and special personnel involved in work under difficult and dangerous conditions. The proposed model allows one to identify the experience of the student before the learning process starts, prepare the student and choose an individual route to complete the training tasks formed according to a constantly growing list of training situations. The complexity of selecting educational situations is caused by the peculiarity of the work of specialist groups, interpersonal relationships and other factors that may hinder the perception of educational situations as new and unfamiliar. The created model makes it possible to simplify the collection of information about the existing experience of a student and select the necessary tasks. The result of working with the training model should be considered the expansion of the trainee's operational field of attention and the development of experience in the constructive response under situations characterized as non-standard.

**Keywords**

non-standard situations, stressful situations, training of specialists, types of response, basic scenarios

**For citation**

Burdyak P. S. Razrabotka modeli podgotovki rabotnikov transporta k rabote v nestandardnykh situatsiyakh [Development of a model for training transport workers to function in non-standard situations]. Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 178–186. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).178-186

**Article Info**

Received: 09.03.2022, Revised: 25.03.2022, Accepted: 25.03.2022

**Введение**

По мнению многих исследователей, профессиональная подготовка специалистов основана на выработке автоматизированных навыков, стандартности действий, предметного мышления. Такая подготовка подразумевает отточенность действий для автоматического воспроизведения их в реальной ситуации. Считается, что это залог высокой дисциплинированности и работоспособности [1–6]. Однако данный автоматизм не гарантирует безошибочную работу специалистов в условиях нестандартной ситуации. Автоматизм в работе может быть нарушен в результате действия биологических механизмов, тем самым будут спровоцированы ошибки в поведении сотрудника.

Человек как биологическое существо имеет ряд особенностей при нахождении в стрессовых ситуациях, поэтому под действием стрессора регулярно возникают ошибки в его деятельности. Ситуации, которые характеризуются для человека как нежелательные, неожиданные, непонятные и т.д. принято называть стрессовыми [7].

Наиболее часто встречающиеся ошибки в работе персонала описаны в работах Д. Ризона и Й. Рассмусена [1, 4]. Оба автора отмечают, что выполняя работу люди действуют два режима: один из которых действует на сознательном уровне, второй – на автоматическом. Сознательный режим имеет ограничения, поэтому выполнять эффективно несколько задач весьма сложно. Для быстрого выполнения знакомых задач, их контроля используется автоматический режим, однако и этот режим может перенасыщаться, нарушая деятельность. Сложность и количество задач напрямую влияют на число ошибок в выполняемой работе.

Ошибки проявляют себя, как правило, в момент переключения между выполняемыми задачами и необходимостью реакций на них [1, 4]. В этот момент происходит ослабление контроля

за выполняемой задачей и перераспределение ресурсов на анализ поступившей информации. Появление дополнительного, более сильного стимула может отодвинуть еще дальше контроль от выполняемой первоначальной задачи и в результате приведет к ошибке в действиях.

Ошибки делятся по когнитивным усилиям на ошибочные действия (slips), замирание (lapses), ошибочное намерение в действии (mistake) [1].

*Slips*. Это ошибки, идентифицируемые с «действиями», которые не были выполнены, были выполнены неправильно или действия, которые не были завершены. Ошибки (slips) могут быть уменьшены за счет сокращения объектов внимания, например, распределение функций, делегирование полномочий, запрет на выполнение дополнительных операций.

*Lapse*. Эта ошибка связана со сбоем в работе памяти и проявляется как «остановка» или «состяние блокировки». Ошибки памяти могут быть уменьшены за счет использования проверки знаний и действий, которые необходимо выполнить в заданной ситуации, путем проверки уже выполненных заданий и сравнения с образцом.

*Mistake*. Под этим термином понимают сознательное планирование действия, совершаемого неверно. Это ошибки преднамеренные, так как из-за ошибочного планирования даже правильных действий, необходимые цели не будут достигнуты. Также к ним относят нарушения умышленные, преднамеренные, не предусмотренные правилами и, противоречащие им.

Й. Расмуссен в своей работе [3] выделил три способа взаимодействия человека с окружающей средой основанных на навыках и опыте (skills), нормах и правилах (rules), уровне знаний (knowledge).

На уровне «навыков» производительность человека регулируется автоматическим

поведением и хорошо запоминается субъектом. Такое поведение является результатом длительных практик, которые позволяют автоматизировать ответы на хорошо известные (знакомые) условия. В этом случае не требуется сознательная обработка или анализ ситуаций, а также не требуется оценка или применение альтернативных решений.

На уровне «норм и правил» поведение человека управляет документами, регламентирующими порядок действий в таких ситуациях. Для этого производится предварительный анализ ситуации, а затем выбор и выполнение соответствующего действия. Такое поведение требует сознательного анализа ситуации и применения правил, которые сохранены в памяти человека и вызваны для управления ситуацией. В таких случаях производительность людей значительно медленнее.

На уровне «знаний» производительность людей ориентирована на анализ совершенно новых ситуаций, сравнение способов и решений для выполнения этих действий. С этой целью различные планы могут быть сформулиро-

ваны или рассмотрены как альтернативные планы по максимизации эффективности и минимизации рисков. В этом случае производительность более низкая, а когнитивная нагрузка самая большая из трех уровней, поскольку она зависит от постоянного обращения к своим знаниям, требующим анализа и интерпретации более сложной информации.

На рис. 1 представлена объединенная схема появления ошибок [1, 4, 5].

В случаях столкновения с совершенно новой проблемой человек не может использовать какие-либо из ранее изученных правил, поэтому результат должен быть достигнут с использованием оригинального решения.

Для подготовки человека к работе в условиях чрезвычайной ситуации, транспортного происшествия и т.д. необходимо вырабатывать навыки по своевременному определению действия стрессора на человека и возможности не выключаться из процесса, а наоборот мобилизоваться для восстановления эффективных действий.

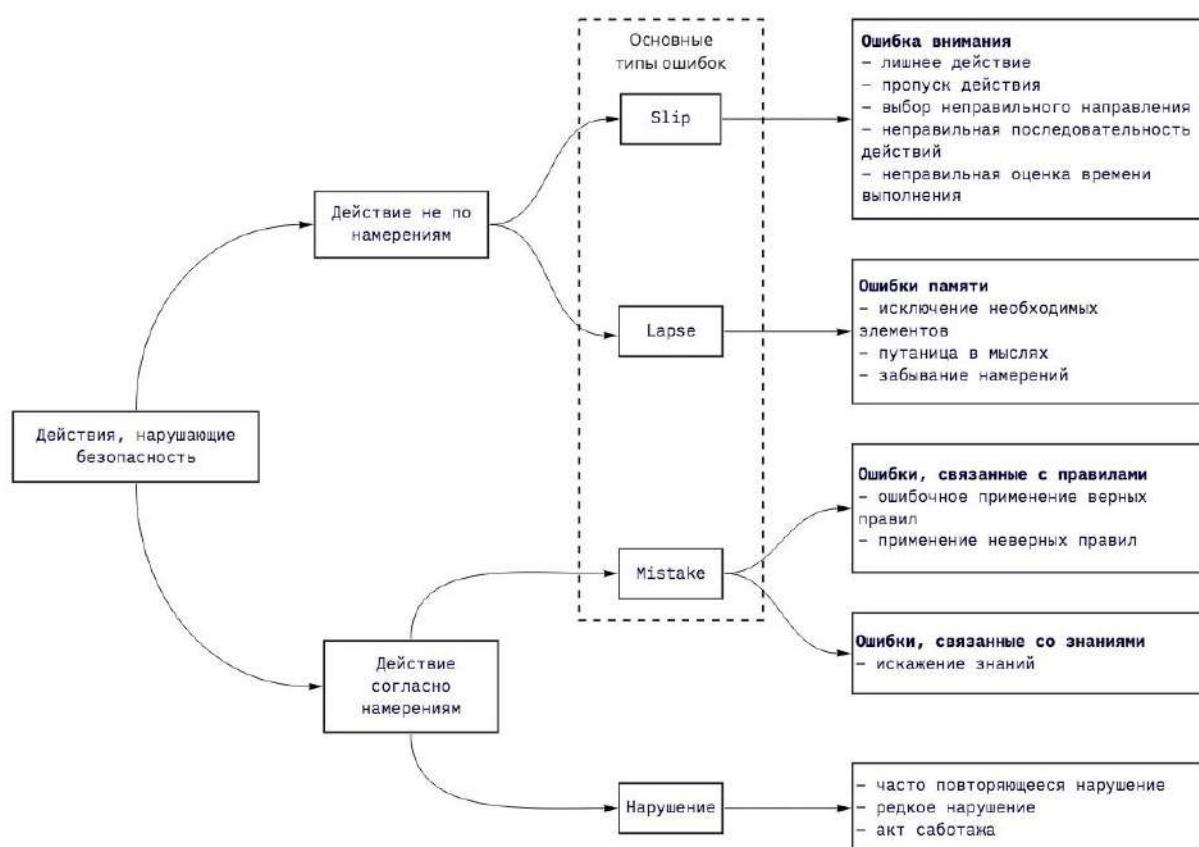


Рис. 1. Объединенная схема моделей работы Д. Ризона и Й. Расмусена  
Fig. 1. J. Reason's and J. Rasmussen's combined scheme of work models

## Формирование модели

Реакция человека на стрессовую ситуацию направлена на удаление стрессора и скорейшее возвращение к удобным и безопасным условиям работы и жизни [8–11]. К этим реакциям относятся, следующие виды реагирования:

- активное – удаление, уничтожение стрессора;
- пассивное – бегство (удаление от стрессора), замирание, затаивание и т. д.;
- конструктивное – стрессовые обстоятельства осваиваются и не наносят дискомфорта;
- стрессово-нейтральное – стрессовые обстоятельства не осваиваются по причине недостатка опыта или невозможности понять опасности последствий.

Активное и пассивное реагирование (как пример импульсивных, поспешных действий и, наоборот, бездействия, медлительности) в равной мере формируют ошибки в действиях. Конструктивное реагирование (быстрое включение в нестандартную, незнакомую ситуацию) свидетельствует об опыте нахождения в схожих условиях либо указывает на развитые качества или способности человека работать в меняющихся условиях.

Для достижения такого результата в подготовке специалистов в рамках тренировочных ситуаций следует включать ситуации, каких не было в опыте обучаемого. В процессе подготовки будет сформирован навык конструктивного реагирования на незнакомое как на знакомое.

Основная проблема в подготовке специалистов к работе в нестандартных ситуациях – определить ситуации, которых нет в опыте человека до начала проведения обучения. Этую проблему предлагается решить за счет непрерывного увеличения пула ситуаций в ходе подготовительной работы с обучаемым по вычленению существующего опыта и формирования на его основе индивидуального маршрута обучения. Сбор информации позволяет исключить похожие ситуации из существующего опыта и пополнить базу заданий для такой же работы с другими участниками обучения. За счет этого, решается задача постоянного пополнения вариантов заданий, их вариаций и сложности.

В статье предлагается включить в процесс обучения работу в условиях нестандартных ситуаций задания из постоянно пополняющегося пула ситуаций, а также принципы выбора заданий для подготовки участников. Эти

ситуации характеризуются как новые для обучаемого, впервые появившиеся в его опыте.

Вероятность знакомства с ситуацией ставит под угрозу выработку навыка в ходе выполнения учебного задания. Ситуации не должны быть узнаваемыми и иметь «статус» обыденного упражнения, воспринимаемого обучаемым как привычные оканчивающиеся испытания.

Для исключения узнаваемости и создания необходимых ограничений для испытуемого принята модель сценариев, используемых в авиации и космонавтике, которая включает принципы:

- воспроизведение во всем многообразии и полноте всего нового, неожиданного и трудно усвояемого;
- развитие моделируемой ситуации в активном, пассивном, конструктивном направлениях;
- описание имеет не полную информацию о происшествии;
- должна использоваться информация о субъективной «возможности» для – пассивного реагирования и «невозможности» для проявления активности [12–14].

Исходя из изложенных принципов, целями подготовки к работе в условиях нестандартных ситуаций являются:

- способность к переработке неполноключенной информации;
- приспособляемость к меняющимся опасным условиям в пространстве и времени;
- активность в поиске нужных признаков и их анализ;
- мобилизация внимания, ощущений, выработка новых решений;
- включение ответственности, совести, свободы выбора и т.д. [15, 16].

При следовании этим целям на первоначальном этапе создаются условия для извлечения уже существующего опыта обучаемого в виде анкеты и предварительного тестирования. Опрос состоит из вопросов, необходимых для установления уже сформированного опыта обучаемого:

- описание случаев участия в нестандартных ситуациях;
- выполняемые роли в нестандартных ситуациях;
- оценка своего поведения в ходе работы над ликвидацией нестандартной ситуации;

- описание ситуаций, с которыми не хотелось бы столкнуться;
- определение качеств, позволяющих лучше справиться с ситуацией, в которой анкетируемый был участником.

Предварительное оценивание (тестирование) включает набор из 10 – 15 вопросов в области окружающего мира, отрасли, вопросов личного характера. Сложность вопросов – высокая, составлена для прогнозируемой проходимости теста на уровне 20 – 40 %. Для достижения такого результата инструктор может добавлять вопросы в тест. Вопросы формируются из длинных предложений, с наличием причастных и деепричастных оборотов, неконкретных слов и фраз (в большинстве случаев). Порядок вопросов произвольный и ограничен по времени ответа. Целью такого анкетирования является запуск подпороговых изменений [13], ожидание оценки для более качественного вхождения в работу над тренировочной ситуацией.

На первом этапе для исключения пересечения опыта участников выполняется их деление по ряду признаков: место работы, принадлежность к группе и месту расположения объектов нестандартных ситуаций (рис. 2).

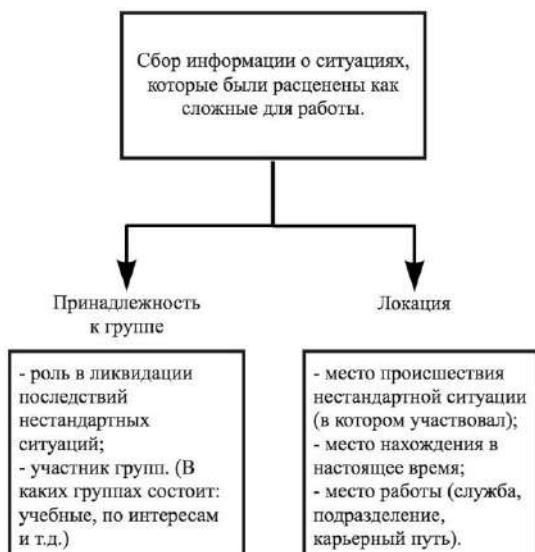


Рис. 2. Схема определения причастности участников к месту происшествия и группе

Fig. 2. The scheme to determine participants' involvement in the scene and the group

Работа на данном этапе позволяет исключить влияние последствий уже совершенных нарушений, так как существующие системы по разбору инцидентов предусматривают возмож-

но больший охват сотрудников, связанных со схожей работой или выполняемыми операциями в ходе их подготовки и переподготовки. Эти действия направлены главным образом на отработку навыков работы в условиях уже случившихся происшествий и формируют навык действий по протоколу, инструкции и т. д. Для избегания сложностей перекрестного обмена информацией обучение происходит не в группах, а в индивидуальном порядке.

На основе данных первого этапа формируется второй этап – маршрут тренировочного цикла. Набор учебных ситуаций должен быть разделен на две части по отношению к обучаемому: ситуации, с которыми не сталкивался обучаемый; ситуации, которые не могут быть использованы для обучаемого.

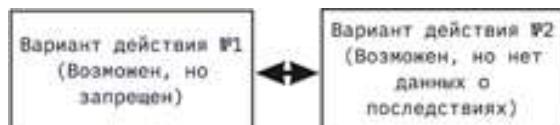
По данным анкетирования и предварительного тестирования делается предположение о типе реагирования обучаемого и выстраивается последовательность учебных ситуаций. Все используемые типы ситуаций адаптируются к базовым сценариям за счет создания условий из набора ситуаций, с которыми обучаемый не сталкивался. Все тренировочные ситуации включают элементы реальных событий, в противном случае есть риск, что они не будут приняты обучаемым всерьез.

К базовым отнесены сценарии: конфликтная ситуация; ситуация, характеризующаяся неожиданным результатом; ситуации с дефицитом времени или информации; ситуация неопределенности; определенная ситуация [14, 16–18].

### Конфликтная ситуация

Для нее характерно то, что перед человеком встает задача выбора одного из двух противоположных, но субъективно одинаково возможных и значимых решений. При этом выбор делается без четкого предсказания того, что именно произойдет в случае реализации того или иного решения. Такого рода ситуации позволяют обучаемому начать сомневаться, увеличить время анализа ситуации и использовать это время для рассуждений. В таких условиях момент выбора становится узнаваемым при разборе особенностей реагирования человека на стрессовые ситуации. На рис. 3 схематически представлены варианты действий, удовлетворяющие требованиям конфликтной ситуации, которые могут ее решить, но они являются

рискованными, последствия не понятны или действия запрещены инструкцией.



**Рис. 3. Схема возможных действий в конфликтной ситуации**  
**Fig. 3. The scheme of possible actions in the conflict situation**

Решение ситуации (см. рис. 3) на первом этапе у обучаемых лежит в плоскости ошибок, поспешных или замедленных действий. Однако в ходе работы с инструктором такие ситуации отрабатываются в плоскости выхода из конфликта и работы с привлечением дополнительных ресурсов. Основная цель первого сценария – это знакомство с типами реагирования.

### Ситуация, характеризующаяся неожиданным результатом

К такой ситуации относятся случаи, в которых человек, совершая целенаправленные действия, ожидает один результат, а встречается с противоположным, как правило, внезапным эффектом. Такого рода ситуации призваны познакомить обучаемого с внезапной реакцией организма на произошедшее. Для понимания ситуации можно привести пример, что ситуации, когда при нажатии педали тормоза на автомобиле не происходит торможение не подходит к описанию с неожиданным результатом. Такая ситуация может произойти объективно из-за неисправности. Наиболее полно эту ситуацию описал бы случай, когда после нажатия на педаль тормоза, автомобиль начинал разгон. На рис. 4 приведена наглядная схема ситуации, характеризующейся неожиданным результатом.



**Рис. 4. Схема возможных действий в ситуации с неожиданным результатом**  
**Fig. 4. The scheme of possible actions in the situation of an unexpected result**

Обучение такого рода ситуациям позволяет обучаемого вытолкнуть в область, которая казалась ранее не возможной, а значит область знакомого и возможного расширится, что позволит в нестандартной ситуации быстрее перейти к конструктивным действиям.

### Ситуация с дефицитом времени или информации

Человек несмотря на отсутствие информации, должен принять единственно правильное решение. Такая ситуация объективно наиболее сложная. Эти две ситуации воспринимаются как невозможные без подготовки обучаемого к непрерывно истекающему времени на выполнение задания или при фрагментарной и разрозненной информации. Работа в таких условиях без подготовки сопровождается стопором, неизбежностью победы ситуации над работником. Условия воспринимаются как невозможные для исполнения имеющимися силами.

Однако после подготовки действовать в такого рода ситуациях восстанавливается ход течения времени, фатальность уходит на второй план, вариативность попыток изменить ситуацию возрастает. Также обстоит дело с ситуацией с недостатком информации: её обработка ускоряется, возникают попытки наладить новые каналы поступления информации, делаются неожиданные выводы и принимаются действия. Обучаемый реже удаляется от решения данных ситуаций, проявляет конструктивное реагирование.

На рис. 5 и 6 представлены наглядные схемы ситуаций с нехваткой времени и информации.



**Рис. 5. Схема возможных действий в ситуации с ограничением времени**  
**Fig. 5. The scheme of possible actions in the limited time situation**



**Рис. 6.** Схема возможных действий в ситуации с недостатком информации

**Fig. 6.** The scheme of possible actions in the situation of a lack of information

В качестве примера к ситуации с нехваткой времени можно привести движение транспортной единицы без управления тормозами; ситуации с нехваткой информации – отсутствие точных данных о месте происшествия, количестве груза и людей.

### Ситуация неопределенности

Ситуация возникает при неправильной оценке противоречивых факторов и руководстве в своих действиях этой оценкой (рис. 7).



**Рис. 7.** Схема возможных действий в ситуации неопределенности

**Fig. 7.** The scheme of possible actions in the situation of uncertainty

Например, нахождение объекта в среде, где он существовать не может, но он там находится; информация, соответствующая всем признакам достоверной, но она ошибочная. В таких условиях у испытуемого нет объективного инструмента выбора одного из «достоверных» вариантов.

### Определенная ситуация

В этой ситуации человек точно знает, что делать и эффект его действий совпадает с ожидаемым результатом (рис. 8).



**Рис. 8.** Схема действий в ситуации с ожидаемым результатом

**Fig. 8.** The scheme of actions in the situation with the expected result

Четкий алгоритм действий предназначен для формирования успеха в прохождении заданий и может быть использован для изучения регламентов работы в условиях нестандартных ситуаций.

К базовым сценариям следует применять сложность заданий от простого к сложному по мере прохождения обучения. Сложность сценариев задается инструктором и выстраивается с резервированием места для сценария, который формирует успешное прохождение.

Первые ситуации должны быть выбраны для определения или подтверждения предположения о типе реагирования. Каждый последующий сценарий имеет цель расширить оперативное поле деятельности за счет разбора каждой ситуации и описания всех элементов: в чем нестандартность, чем обусловлены реакции, какие они бывают. Это позволяет формировать навык оценки собственного поведения. Осознание этого позволяет расширить оперативное поле восприятия и внимания.

Максимальная сложность заданий может быть реализована в групповой работе, направленной на получение навыка оценки поведения участников. Использование такой сложности обусловлено подготовкой руководителей, участвующих в ликвидации последствий транспортных происшествий.

Базовые сценарии должны отвечать требованиям новой, неизвестной информации. Однако само тренировочное задание может включать задания на возможное прогнозирование ситуации; оценку ситуации; мышление и память; скорость выполнения; вербализацию.

Для всех сценариев организуется система фиксации реакций обучаемого в ходе прохождения тренировочного задания. Основными фиксируемыми параметрами реакций должны быть: поисковая застопоренность, движение рук, речь.

Работа инструктора при прохождении базовых сценариев включает деятельность по разбору реакций с целью узнавания человеком своих реакций в последствии самостоятельно. По мере прохождения последовательности из шести сценариев количество и качество фиксаций на собственном реагировании увеличивается.

В ходе прохождения тренировочных заданий проявляются конструктивные реакции при встрече со сложными ситуациями. Характерными результатами выступают:

- ускорение принятия решений;
- уменьшение числа ошибочных решений;
- расширение творческих ассоциаций;
- острая направленность внимания и мышления.

Таким образом у испытуемого происходит смещение вглубь границы стресса, когда происходит «сбой» в сторону расширения предпороговых изменений, что субъективно позволяет оценивать большее количество ситуаций как знакомые или возможные, тем самым снижая влияние неблагоприятных факторов действия стрессора.

По итогам прохождения шести базовых сценариев готовится материал для последующей самостоятельной подготовки обучаемого. Данный этап позволяет повторить полученный опыт, не дает доминировать более свежему опыту над более ранним.

Итоговая схема формирования учебно-методических материалов и последовательность прохождения базовых сценариев представлена на рис. 9.

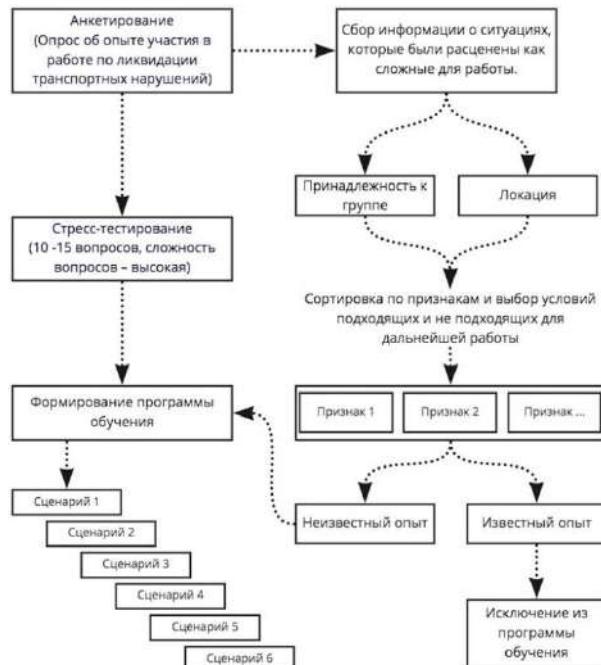


Рис. 9. Схема модели обработки и подготовки информации для обучения

Fig. 9. The model scheme of processing and preparing the training information

## Заключение

Представленная в статье модель позволяет упростить систему подготовки исходных данных и выбор ситуаций для обучения на основе исключения существующего опыта из учебных ситуаций.

Выполнение комплекса базовых сценариев формирует навыки обучаемого в незнакомых и стрессовых ситуациях, надежнее используются основные умения в работе по инструкции или алгоритму, снижается доля ошибочных действий.

## Список литературы

1. Reason J. Human error. NY : Cambridge University Press, 1990. 302 p.
2. Evaluation of human reliability analysis methods against good practices (NUREG-1842) / J. Forester, A. Kolaczkowski, E. Lois et al. Washington, D.C. : US NRC, 2006.
3. Миллер Д., Суэйн А. Ошибки человека и его надёжность // Человеческий фактор. 1991. Т.1 С. 360–417.
4. 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.
5. Rasmussen J., Pejtersen A.M., Goodstein L.P. Cognitive systems engineering. New York : John Wiley & Sons, 1994. 378 p.
6. Канеман Д. Думай медленно... решай быстро. М. : ACT, 2014. 625 с.
7. Селье Г. На уровне целого организма. М. : Наука, 1972. 122 с.
8. Пономаренко В.А., Ворона А.А., Лапа В.В. Стратегические направления решения проблемы человеческого фактора в военной авиации // Военная мысль. 2017. № 4. С. 35–42.
9. Пономаренко В.А. Экстремальность как порождение вызова духовных и креативных сил // Развитие личности. 2011. № 4. С. 41–58.
10. Бахтияров О.Г. О методах регуляции психофизиологического состояния оператора // Тезисы сообщений к VI всесоюзному съезду общества психологов СССР. М., 1983.
11. Загнибода В.Д., Бахтияров О.Г. Приемы психорегуляции для подготовки операторов // Тезисы VI Всесоюзной конференции по инженерной психологии. М., 1984.

12. Влияние методики деконцентрации внимания для обучения избегания контакта с опасностью в экстремальной ситуации / А.В. Ермаков и др. // Экстремальная деятельность человека. 2018. № 1 (47). С. 30–33.
13. Китаев-Смык Л.А. Психология стресса: психологическая антропология стресса. М. : Академический проект, 2009. 943 с.
14. Пономаренко В.А. Социально-психологическое содержание боевого стресса // Психологический журнал. 2004. Т. 25. №3. С. 98–102.
15. Пономаренко В.А. Психология человеческого фактора в опасной профессии. Красноярск : Поликом, 2006. 618 с.
16. Обучение обнаружению скрытых признаков нападения в ходе подготовки к ведению ближнего и рукопашного боя / А.В. Ермаков и др. // Теория и практика физической культуры. 2017. № 1. С. 50–52.
17. Ротенберг В.С., Аршавский В.В. Поисковая активность и адаптация. М. : Наука, 1984. 193 с.
18. Пономаренко В.А. Экстремальность и проблема отношения к профессиональной деятельности и в профессиональной жизнедеятельности // Мир психологии. 2006. № 4. С. 38–46.

### References

1. Reason, J. Human error. NY: Cambridge University Press, 1990. 302 p.
2. Forester J, Kolaczkowski A., Lois E. et al. Evaluation of human reliability analysis methods against good practices (NUREG-1842). Washington, D.C.: US NRC, 2006.
3. Miller D., Swain A. Oshibki cheloveka i ego nadyozhnost' [Human errors and its reliability]. *Chelovecheskiy faktor [The Human Factor]*. 1991, Vol. 1, pp. 360-417.
4. Rasmussen J. Human errors: a taxonomy for describing human malfunction in industrial installations // Journal of Occupational Accidents. 1982. Vol. 4. No. 2-4. P. 311-335.
5. Rasmussen J., Pejtersen A.M., Goodstein L.P. Cognitive systems engineering. New York : John Wiley & Sons, 1994. 378 p.
6. Kahneman, D. Dumlenno... reshay bystro [Think Slowly... decide quickly]. Moscow: AST Publ., 2014. 625 p.
7. Hans Selye. Na urovne tselogo organizma [At the level of the whole organism]. Moscow: Nauka Publ., 1972. 122 p.
8. Ponomarenko V.A., Vorona A.A., Lapa V.V. Strategicheskie napravleniya resheniya problemy chelovecheskogo faktora v voennoy aviatii [Strategic directions for solving the problem of human factor in military aviation]. *Voennaya mysl'* [Military thought]. 2017, no. 4, pp. 35-42.
9. Ponomarenko V.A. Ekstremal'nost' kak porozhdenie vyzova dukhovnykh i kreativnykh sil [Extremity as a generation of the challenge of spiritual and creative forces]. *Razvitiye lichnosti* [Personality development]. 2011, no 4, pp. 41-58.
10. Bakhtiyarov O.G. O metodakh reguliyatsii psikhofiziologicheskogo sostoyaniya operatora [On the methods of regulation of the physiological state of the operator]. *Tezisy soobscheniy k VI vsesoyuznomu s"ezdu obschestva psikhologov SSSR* [Abstracts of reports to the VI all-Union Congress of the society of psychologists of the USSR]. Moscow. 1983.
11. Zagnibeda V. D., Bakhtiyarov O.G. Priemy psikhoregulyatsii dlya podgotovki operatorov [The techniques of psychoregulation for the training of operators]. *Tezisy VI Vsesoyuznoy konferentsii po inzhenernoy psikhologii* [Proceedings of the VI all-Union conference on engineering psychology]. 1984.
12. Ermakov A.V. [et al.]. Vliyanie metodiki dekonsentratsii vnimaniya dlya obucheniya izbeganiya kontakta s opasnost'yu v ekstremal'noy situatsii [The influence of the deconcentration of attention technique for teaching avoiding contact with danger in an extreme situation]. *Ekstremal'naya deyatel'nost' cheloveka* [Extreme human activity]. 2018, no 1 (47), pp. 30-33.
13. Kitaev-Smyk L.A. Psikhologiya stressa: psikhologicheskaya antropologiya stressa [Psychology of stress: psychological anthropology of stress]. Moscow: Akademicheskiy proekt, 2009. 943 p.
14. Ponomarenko V.A. Sotsial'no-psikhologicheskoe soderzhanie boevogo stressa [Socio-psychological content of combat stress]. *Psikhologicheskiy zhurnal* [Psychological journal]. 2004, vol. 25, no 3, pp. 98-102.
15. Ponomarenko V.A. Psikhologiya chelovecheskogo faktora v opasnoy professii [Psychology of the human factor in a dangerous profession]. Krasnoyarsk: Polikom Publ., 2006. 618 p.
16. Ermakov A.V. [et al.]. Obuchenie obnaruzheniyu skrytykh priznakov napadeniya v khode podgotovki k vedeniyu blizhnego i rukopashnogo boya [Training in detecting hidden signs of an attack in preparation for conducting melee and hand-to-hand combat]. *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury* [Theory and practice of physical culture]. 2017, no 1, pp. 50-52.
17. Rotenberg V.S., Arshavsky V.V. Poiskovaya aktivnost' i adaptatsiya [Search activity and adaptation]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 193 p.
18. Ponomarenko V.A. Ekstremal'nost' i problema otnosheniya k professional'noy deyatel'nosti i v professional'noy zhiznedeyatel'nosti [Extremality and the problem of attitude to professional activity and in professional life]. *Mir psikhologii* [World of psychology]. 2006, no 4, pp. 38-46.

### Информация об авторах

**Бурдяк Павел Станиславович**, канд. техн. наук, 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**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Railway stations and junctions», Siberian Transport University, Novosibirsk, e-mail: burdyakps@mail.ru

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ  
И ОБРАБОТКА**

**INFORMATION TECHNOLOGY, MANAGEMENT  
AND PROCESSING**

## Разработка алгоритма расчета потребности профильного недвижимого имущества объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры с целью оптимизации грузовой работы

В. А. Оленцевич, Н. В. Власова✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российской Федерации

✉ astrahancev1943@mail.ru

### Резюме

Ключевым направлением инвестиционной политики ОАО «Российские железные дороги» до 2030 г. является расширенное внедрение стратегически важных проектов комплексного плана, направленного на модернизацию и расширение транспортной инфраструктуры и повышение эффективности работы ее объектов. Цель проекта – обеспечение максимального прироста грузооборота страны в соответствии с Указом Президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 7 мая 2018 г. № 204, в рамках чего предусматривается комплекс мер, направленных на повышение уровня провозной способности Восточного полигона к 2025 г. до 200 млн т. Реализация плановых мероприятий по модернизации, обновлению и сооружению новых объектов транспортной инфраструктуры позволит обеспечить прирост объемов грузоперевозок до 5 % в год, а также будет способствовать увеличению уровня пропускной способности железных дорог Восточного полигона. Авторы в представленной статье отмечают, что существует необходимость разработки и апробации алгоритма расчета потребности профильного недвижимого имущества объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры с целью оптимизации грузовой работы. Такой алгоритм позволит определить реальные технические возможности имеющихся объектов и сделать обоснованные выводы о необходимости их модернизации. Представлены основные принципы определения достаточности и избыточности недвижимого имущества, дана классификация объектов недвижимого имущества грузового сектора с целью определения достаточности или избыточности.

### Ключевые слова

прогнозные значения, алгоритм расчета потребности, организация грузовой работы, объект железнодорожной транспортной инфраструктуры, достаточность или избыточность, профильное недвижимое имущество, эффективность использования

### Для цитирования

Оленцевич В. А. Разработка алгоритма расчета потребности профильного недвижимого имущества объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры с целью оптимизации грузовой работы / В. А. Оленцевич, Н. В. Власова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 188–197. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).188-197

### Информация о статье

поступила в редакцию: 21.02.2022 г.; поступила после рецензирования: 28.02.2022 г.; принята к публикации: 01.03.2022 г.

## Development of an algorithm for calculating the needs of railway transport infrastructure facilities for profile real estate in order to optimize cargo work

В. А. Оленцевич, Н. В. Власова✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ natalya.vlasova.76@list.ru

### Abstract

The key direction of the investment policy of JSC "Russian Railways" up to 2030 is the expanded implementation of strategically important projects of a Comprehensive plan aimed at modernizing and expanding the transport infrastructure and improving the efficiency of its facilities. The objective of the project is to ensure the maximum increase in the country's cargo turnover in accordance with the Decree of the President of the Russian Federation "On National goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024" dated May 7, 2018, No. 204, which provides for a set of measures aimed at increasing the level of carrying capacity of the Eastern Polygon to 200 million tons by 2025 year. The implementation of planned measures for the modernization, renovation and construction of new transport infrastructure facilities will ensure an increase in cargo transportation volumes up to 5 percent per year, and will also contribute to an increase in the level of the railways' carrying capacity of the Eastern Polygon. In the article the authors note that there is a need to develop and test an algo-

rithm for calculating the needs of railway transport infrastructure facilities for profile real estate in order to optimize freight work, making it possible to determine the actual technical capabilities of the existing facilities and draw reasonable conclusions about the need for their modernization. The basic principles for determining the sufficiency and redundancy of real estate are presented, the classification of real estate objects of the cargo sector is given in order to determine its sufficiency or redundancy.

### Keywords

forecast values, the algorithm for calculating the need, the organization of freight work, the object of railway transport infrastructure, sufficiency or redundancy, profile real estate, efficiency of use

### For citation

Olentsevich V. A., Vlasova N. V. Razrabotka algoritma rascheta potrebnosti profil'nogo nedvizhimogo imushchestva ob'ektov zheleznodorozhnoi transportnoi infrastruktury s tsel'yu optimizatsii gruzovoi raboty [Development of an algorithm for calculating the needs of railway transport infrastructure facilities for profile real estate in order to optimize cargo work]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 188–197. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).188-197

### Article Info

Received: 21.02.2022; revised: 28.02.2022; accepted: 01.03.2022.

### Введение

Прогнозные значения прироста объемов работ в сфере грузовых перевозок ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») основываются на ключевых принципах экономического развития России, ее укрепления на транспортном рынке и прочих стратегических подходах, поставленных в Указе Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204, прогнозах транспортных ведомств по развитию грузовых перевозок, в большей степени отражающих плановые показатели оптимизации грузообразующих секторов экономики России, степени развития внешнеэкономических цепочек, заявок наиболее мощных грузоотправителей, результатов маркетинговых исследований клиентов железнодорожной отрасли, а также показателей межотраслевого транспортного баланса. [1–5]. Расширенный план по развитию, модернизации, модификации, цифровизации объектов транспортной инфраструктуры ОАО «РЖД» на период до 2024 года, утвержденный в [6], предусматривает реализацию комплекса мер по формированию современных, высокооснащенных грузовых мультимодальных объектов транспортного и логистического блоков [1, 7].

Реализация разделов представленной Программы развития транспортной отрасли, обеспечение прогнозных показателей функционирования ОАО «РЖД» предусматривается за счет осуществления приоритетных инвестиционных проектов (в том числе по поручениям Президента Российской Федерации и Правительства Российской Федерации) и реализации комплексных инициатив, позволяющих обеспечить внедрение технологических решений, увяз-

занных с планами развития инфраструктуры и обновления подвижного состава, а также мероприятий по достижению целевых показателей ориентированности на клиентов по срокам и скорости доставки грузов.

В целом реализация инвестиционной программы станет драйвером роста экономики Российской Федерации, позволит ОАО «РЖД» обеспечить прогнозные показатели технологической и экономической эффективности, темпы роста производительности труда и снижения себестоимости перевозок. Общий размер инвестиционных затрат ОАО «РЖД» в 2019–2025 годах по базовому сценарию составляет 4 671,4 млрд рублей. В рамках формирования инвестиционной программы дополнительно проанализированы проекты по развитию железнодорожной инфраструктуры, которые потенциально могут реализоваться в этот период частично за счет средств других инвесторов, выражаяющих свою заинтересованность во вложении средств в железнодорожные проекты. Запланированный объем указанных инвестиций оценивается в размере 3 986,7 млрд рублей. Общий объем финансирования инвестиционной программы до 2025 г. с учетом средств прочих инвесторов оценивается в 8 658,1 млрд рублей [1, 2, 5, 8].

В связи с представленными факторами очевидно, что для повышения эффективности организации и управления грузовой работой существует необходимость разработки методологического подхода по расчету потребности профильного недвижимого имущества объектов железнодорожной транспортной инфра-

структуры, который позволит анализировать технические возможности имеющихся объектов и производить прогноз необходимого уровня модернизации существующих объектов, а также параметров сооружения новых [9].

### Алгоритм определения достаточности или избыточности профильного недвижимого имущества объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры

В качестве потенциально избыточного объекта транспортной инфраструктуры ОАО «РЖД» понимают объект, степень вовлеченности которого в производственный процесс грузовых перевозок, рассчитанная в ходе предварительного анализа по показателям в соответствии с типом объекта, ниже для показателей «загрузка» и «utiлизация» либо выше для показателя «обеспеченность» установленных нормативных значений.

Под потенциально недостаточным объектом понимают объект, степень вовлеченности которого в производственный процесс грузовых перевозок, рассчитанная в ходе предварительного анализа по показателям в соответствии с типом объекта, выше для показателей «загрузка» и «utiлизация», либо ниже для показателя «обеспеченность» установленных нормативных значений [10].

Порядок определения процесса взаимодействия в аппарате управления ОАО «РЖД» при проведении мероприятий по определению достаточности или избыточности профильного недвижимого имущества с целью выбора наиболее эффективного способа его использования является достаточно сложным и трудоёмким [2, 11].

Алгоритм определения достаточности или избыточности профильного недвижимого имущества объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры представлен на рис. 1.

Приведем основные принципы определения достаточности или избыточности недвижимого имущества:

- приоритетным уровнем детализации является объект недвижимого имущества;

- выбор уровня детализации обуславливается наличием достоверных данных, способствующих эффективному расчету необходимых показателей и уровнем автоматизации учета имеющихся данных;

- в случае отсутствия возможности определения достаточности или избыточности применительно к объекту недвижимого имущества достаточность или избыточность определяется в отношении производственного участка;

- в случае, если объект недвижимого имущества задействован в нескольких производственных процессах и используется одновременно несколькими пользователями, необходимо определение достаточности или избыточности для каждого конкретного пользователя применительно к используемой им функциональной зоне [1, 12, 13].

Определение нормативов достаточности или избыточности профильного недвижимого имущества объектов ОАО «РЖД» необходимо производить не менее одного раза в три года. Расчет и формирование технических предложений по установлению нормативов достаточности или избыточности производится пользователем.

Определение нормативов достаточности или избыточности для каждого типа объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры



**Рис. 1** Алгоритм определения достаточности или избыточности профильного недвижимого имущества предприятий и структурных подразделений ОАО «Российские железные дороги»

**Fig. 1.** Algorithm for determining the profile real estate sufficiency or redundancy in the enterprises and structural subdivisions of the JSC «Russian railways»

туры осуществляется по показателям деятельности:

– показатель загрузки объекта, определяется как отношение фактического объема выполняемой работы к проектной мощности;

– показатель утилизации (из расчета выработки на  $m^2$ ), определяется как отношение фактического объема выполняемой работы (либо площади, занимаемой оборудованием и персоналом) к фактической площади за вычетом площади, переданной во владение или пользование третьим лицам (если таковые присутствуют);

– показатель обеспеченности ( $m^2$  на одного человека / единицу техники), определяется отношением фактической площади за вычетом площади, переданной во владение или пользование третьим лицам, к количеству человек или количеству единиц техники (автомобили, по-

грузо-разгрузочные машины и оборудование, спецтехника и т.п.) [14–16].

Применимость каждого показателя к конкретному типу объекта, а также классификация объектов недвижимого имущества для целей определения достаточности или избыточности приведены на примере структурных подразделений по организации грузовой работы (табл. 1).

При определении нормативного значения для каждого типа объектов целесообразно рассчитывать значение показателя по каждому конкретному объекту соответствующего профиля за три предыдущих года его эксплуатации, определяя при этом среднеарифметическое значение, после чего рассчитанные средние показатели по каждому типу объектов ранжируются и располагаются по возрастанию – от меньшего к большему.

**Таблица 1.** Классификация объектов недвижимого имущества грузового сектора с целью определения достаточности или избыточности

**Table 1.** Classification of the real estate objects of freight sector to determine their sufficiency or redundancy

Тип объекта недвижимого имущества	Описание	Наименование показателя	Формула расчета показателя
Автостоянки	Специальные открытые площадки, здания или сооружения, где пассажирам предоставляется услуга временной стоянки транспортных средств	Показатель загрузки	$\frac{\text{Среднесуточное заполнение автостоянки (по году, машино-мест)}}{\text{Максимальная вместимость стоянки (машино-мест)}}$
Багажные объекты	Здания или сооружения, предназначенные для временного хранения багажа, а также обслуживания деятельности по временному хранению багажа	Показатель загрузки	$\frac{\text{Количество багажа в пиковый период (шт)}}{\text{Максимальная вместимость объекта в единицах багажа, шт}}$
Гаражи	Здания или сооружения, предназначенные для стоянки и ремонта транспортных средств или погрузо-разгрузочных устройств	Показатель обеспеченности	$\frac{[\text{Фактическая площадь багажа } (m^2) - \text{Площадь, сданная в пользование / аренду третьим лицам } (m^2)]}{\text{Количество автомобилей/спецтехники (шт.)}}$
Мойки (дезпромывочные станции)	Здание или сооружение, где производится очистка, промывка и дезинфекция подвижного состава	Показатель загрузки	$\frac{\text{Количество вымытых вагонов за год (шт.)}}{\text{Расчетная мощность (шт.)}}$
Объекты водоснабжения	Здания или сооружения, где находится оборудование, обеспечивающее добычу воды	Показатель загрузки	$\frac{\text{Пиковый дневной объём забора воды } (m^3)}{\text{Проектная мощность по забору воды в год, } m^3}$

Площадки грузовые	Специальные открытые площадки, предназначенные для разгрузки, погрузки и хранения грузов	Показатель утилизации	<u>Оборачиваемость склада за год (т)</u> [Фактическая площадь объекта (м <sup>2</sup> ) – Площадь, сданная в пользование / аренду третьим лицам (м <sup>2</sup> )]
Склады (товарно-материальные ценности)	Здания или сооружения, предназначенные для хранения материальных ценностей	Показатель утилизации	<u>Оборачиваемость склада за год (т)</u> [Фактическая площадь объекта (м <sup>2</sup> ) – Площадь, сданная в пользование / аренду третьим лицам (м <sup>2</sup> )]
Склады (наливные грузы)	Здания или сооружения, предназначенные для хранения наливных грузов	Показатель утилизации	<u>Среднедневной занятый объём склада (м<sup>3</sup>)</u> Фактический объём склада (м <sup>3</sup> )
Склады (сыпучие грузы)	Здания или помещение, предназначенные для хранения сыпучих грузов	Показатель утилизации	<u>Оборачиваемость склада за год (т)</u> [Фактическая площадь объекта (м <sup>2</sup> ) – Площадь, сданная в пользование / аренду третьим лицам (м <sup>2</sup> )]
Склады топливные	Здания или сооружения, предназначенные для хранения топлива	Показатель загрузки	<u>Наличный запас по дизельному топливу/мазуту в среднем за год (т)</u> Объём исправного резервуарного парка по дизельному топливу/мазуту (т)
Хлораторные объекты	Здания или сооружения, где осуществляется процесс хлорирования, дозирования и хранения жидкостей	Показатель утилизации	<u>Количество очищенных вагонов за год (шт.)</u> [Фактическая площадь объекта (м <sup>2</sup> ) – Площадь, сданная в пользование / аренду третьим лицам (м <sup>2</sup> )]

При условии работы объекта железнодорожной транспортной инфраструктуры менее трех лет или в случае его реконструкции или модернизации в течение исследуемого времени соответствующий показатель для данного объекта определяется за период с момента ввода в эксплуатацию, завершения реконструкции или модернизации на основании [17].

### Порядок расчета нормативов достаточности и избыточности объектов транспортной инфраструктуры

Нормативы достаточности или избыточности по показателю загрузки необходимо рассчитывать в виде диапазона нижней и верхней границ. В табл. 2 представлены источники и единицы измерения данных для расчета показателей.

Порядок определения нижней границы диапазона:

- определить среднее значение загрузки по всем объектам одного типа;
- выбрать 20 % наименее загруженных объектов из числа объектов с уровнем загрузки ниже среднего значения;

– уровень границы приравнивается к наибольшему значению из выборки (20 % наименее загруженных объектов).

Верхняя граница определяется как 100 % загрузка объектов, либо по уровню загрузки, установленному паспортами инвестиционных проектов для соответствующей категории объектов.

По показателю утилизации нормативы достаточности или избыточности целесообразно определить также в виде диапазона границ.

Расчет нижней границы диапазона определим в следующем порядке:

– рассчитать среднее значение уровня утилизации по всем объектам одного типа;

– выбирать 20 % наименее утилизированных объектов из числа объектов с уровнем утилизации ниже среднего значения;

– уровень границы приравнять к наибольшему значению из выборки (20 % наименее утилизированных объектов).

Верхняя граница диапазона достаточности рассчитывается в следующем порядке:

– определить среднее значение утилизации по всем объектам одного типа;

– выбирать 20 % наиболее утилизированных объектов из числа объектов с уровнем утилизации выше среднего значения;

– уровень границы приравнять к наименьшему значению из выборки (20 % наиболее утилизированных объектов).

Нормативы достаточности или избыточности по показателю обеспеченности рассчитываются в виде диапазона нижней и верхней границ.

Нижнюю границу диапазона целесообразно рассчитывать в следующем порядке:

– определить среднее значение обеспеченности по всем объектам одного типа;

– выбрать 20 % наименее обеспеченных объектов из числа объектов с уровнем обеспеченности ниже среднего значения;

– уровень границы приравнивается к наибольшему значению из выборки (20 % наименее обеспеченных объектов).

Верхняя граница диапазона рассчитывается в следующем порядке:

– определяется среднее значение обеспеченности по всем объектам одного типа;

– выбирается 20% наиболее обеспеченных объектов из числа объектов с уровнем обеспеченности выше среднего значения;

– уровень границы приравнивается к наименьшему значению из выборки (20 % наиболее обеспеченных объектов).

### Порядок проведения оценки достаточности и избыточности объектов транспортной инфраструктуры

Согласно законодательно установленной процедуре, оценка достаточности и избыточности осуществляется ежегодно в срок до 1 июля и включает в себя два этапа:

– предварительный сквозной анализ объектов в целях выявления потенциально избыточных и потенциально недостаточных объектов;

– детальный анализ потенциально избыточных и потенциально недостаточных объектов [2, 10, 18–21].

По каждому объекту транспортной инфраструктуры производится сравнение фактических показателей с нормативным значением. Объекты с загрузкой до нижней границы диапазона целесообразно относить к потенциально избыточным, с загрузкой выше верхней границы диапазона – к потенциально недостаточным. Объекты в границах диапазона являются доста-

точными. Объекты с утилизацией до нижней границы диапазона будут относиться к потенциально избыточным, выше верхней границы диапазона – потенциально недостаточным, в границах диапазона – достаточные. Объекты с обеспеченностью до нижней границы диапазона целесообразно относить к потенциально недостаточным, выше верхней границы диапазона – к потенциально избыточным, в границах диапазона объекты являются достаточными.

По итогам предварительного анализа необходимо сформировать полный отчет об эффективности использования объектов. В целях верификации результатов, полученных в рамках предварительного анализа, проводится детальный анализ каждого потенциально избыточного и потенциально недостаточного объекта, который включает в себя следующие направления:

– анализ соответствия фактических технических характеристик объекта с указанными в информационных системах ОАО «РЖД», в том числе в Системе управления имущественным комплексом ОАО «РЖД» (СУИК);

– осмотр объекта на предмет соответствия СанПиНам, СП/СНиПам, правилам обеспечения охраны труда и безопасности, прочим нормам для соответствующих категорий объектов, в том числе в части наличия оборудования для обеспечения функционирования объекта, иным нормативным документам, в соответствии с категориями (типами) объектов и спецификой производственных процессов;

– анализ особых условий, к которым целесообразно отнести географические, природные, социальные, политические и прочие – отсутствие альтернатив переключения производственной деятельности или ее передислокации.

Для потенциально избыточных объектов необходимо организовывать проверку на предмет наличия ограничений объекта в обороте и на предмет наличия утвержденных планов и программ развития железнодорожной инфраструктуры ОАО «РЖД», предполагающих сохранение, реконструкцию, снос объекта, а также наличия утвержденных требований по резервированию мощностей, таких как обеспечение запаса мощностей по основному производственному процессу, которые будут задействованы при возникновении нештатных ситуаций или наступлении риска.

**Таблица 2. Источники и единицы измерения данных для расчета показателей**  
**Table 2. Data sources and measure units for calculation of indicators**

Тип объекта недвижимого имущества	Показатель	Единица измерения
Автостоянки	Среднесуточное заполнение автостоянки (за год)	машино-место
	Максимальная вместимость стоянки	машино-место
Багажные объекты	Количество хранимого багажа (в пиковый период)	ед. багажа
	Максимальная вместимость объекта	ед. багажа
Гаражи	Количество автомобильной / спецтехники	шт.
Площадки грузовые	Оборачиваемость за год	т
Склады (товарно-материальные ценности)	Оборачиваемость склада за год	т
Склады (наливные грузы)	Среднедневной занятый объем склада за год	м <sup>3</sup>
	Фактический объем склада	м <sup>3</sup>
Склады (сыпучие грузы)	Оборачиваемость склада за год	т
Склады топливные	Наличный запас по дизельному топливу / мазуту в среднем за год	т
	Объем исправного резервного парка по дизельному топливу / мазуту	т
Хлораторные объекты	Количество очищенных вагонов за год	шт.
Цеха, заводы, депо (ремонт локомотивов)	Количество отремонтированных секций локомотивов за год	шт.
	Проектная мощность здания за год	шт. секций
Все типовые объекты	Фактическая площадь объекта	м <sup>2</sup>
	Площадь, сданная в пользование/аренду третьим лицам	м <sup>2</sup>

По результатам детального анализа работы объекта транспортной инфраструктуры необходимо оформить итоговый отчет по каждому потенциально избыточному и потенциально недостаточному объекту, которые и будут представлены технологическому эксперту с целью верификации и согласования результатов оценки достаточности или избыточности. В качестве технологического эксперта может выступать структурное подразделение или подразделение аппарата управления ОАО «РЖД», осуществляющее функции единого центра компетенций ОАО «РЖД», по оценке эффективности использования профильного недвижимого имущества с учетом технологически обоснованной потребности.

Технологический эксперт вправе осуществить выборочную проверку в отношении объектов, признанных достаточными, и выдать мотивированные рекомендации по корректировке результатов оценки, а также предложить оптимальный сценарий дальнейшего использования избыточных и недостаточных объектов.

### **Проработка возможных сценариев дальнейшего использования избыточных и недостаточных объектов транспортной инфраструктуры**

При выявлении по результатам оценки избыточных или недостаточных объектов транспортное предприятие должно в короткий срок произвести проработку сценариев дальнейшего их использования.

Если объект признан недостаточным, выбирается один из следующих сценариев, который является экономически целесообразным:

– оптимизация технологического процесса на базе объекта;

– реконструкция или модернизация объекта для увеличения его производственных мощностей;

– вовлечение дополнительных объектов в производственный процесс;

– прочие сценарии при необходимости.

Если объект признан избыточным, осуществляется оценка следующих сценариев для выбора наиболее экономически целесообразного:

– дозагрузка объекта;

– перепрофилирование и загрузка объекта;

- новое строительство на освобожденном земельном участке взамен существующего избыточного объекта;
- использование объекта «как есть», при отсутствии возможности реализации иных вариантов либо их экономической нецелесообразности;
- возмездное отчуждение объекта;
- передача объекта в аренду;
- перепрофилирование (ремонт) объекта и его последующее возмездное отчуждение;
- перепрофилирование (ремонт) объекта и его последующая передача в аренду;
- ликвидация ( списание и снос) объекта и продажа освобожденного земельного участка;
- ликвидация ( списание и снос) объекта и передача освобожденного земельного участка в аренду или субаренду;
- ликвидация объекта, его списание и снос;
- консервация объекта;
- дарение или пожертвование объекта;
- отказ от аренды объекта, если он находится в собственности третьего лица и используется ОАО «РЖД» по договору аренды.

Оценку возможных сценариев использования избыточного производственного участка целесообразно осуществлять применительно к каждому объекту недвижимого имущества. При разработке нескольких вариантов сценариев, выбирается наиболее эффективный исходя из критериев: чистой приведенной стоимости, т. е. суммарного значения дисконтированных платежей, приведенных к периоду оценки, включая

чающей все доходы и затраты, связанные с эксплуатацией объекта (в том числе затраты на обслуживание, надзор за техническим состоянием и затраты на текущее содержание), текущий и капитальный ремонт.

Целевым является сценарий с наибольшей чистой приведенной стоимостью, исключение составят случаи, когда по итогам изучения внутреннего спроса будет очевидна потребность в объекте для целей обеспечения производственных процессов ОАО «РЖД» со стороны иных структурных подразделений отрасли, либо в случае целесообразности дозагрузки или перепрофилирования объекта для собственных нужд ОАО «РЖД».

## Заключение

В статье представлены основные принципы определения достаточности или избыточности недвижимого имущества, дана классификация объектов недвижимого имущества грузового сектора с целью определения достаточности или избыточности.

Представленный алгоритм позволит определить реальные технические возможности имеющихся объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры в сфере грузовых перевозок, произвести анализ необходимости и степени их обновления, проработать возможные сценарии дальнейшего использования избыточных и недостаточных объектов транспортной инфраструктуры.

## Список литературы

1. Стратегия развития Холдинга «РЖД» на период до 2030 года // ОАО «РЖД» : сайт. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=804> (Дата обращения 10.02.2022).
2. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : сайт. URL: <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 10.02.2022).
3. Что такое проект «Восточный полигон» // Gudok.ru : сайт. URL: [https://gudok.ru/content/sujet/eastern\\_polygon/1180731/](https://gudok.ru/content/sujet/eastern_polygon/1180731/) (Дата обращения 10.02.2022).
4. Оленцевич В.А., Власова Н.В. Оценка удовлетворенности качеством услуг грузовых железнодорожных перевозок // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2021. № 8. С. 187–188.
5. Булохова Т.А., Колосов И.В. Актуальные проблемы материально-технического обеспечения на железнодорожном транспорте // Развитие экономической науки на транспорте: экономическая основа будущего транспортных систем : сб. ст. VII междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2019 С. 139–146.
6. Об утверждении Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.09.2018 г. № 2101-р. URL: <http://government.ru/docs/34297/> (Дата обращения 12.02.2022).
7. Власова Н.В., Оленцевич В.А. Необходимость разработки новых проектных решений по реконструкции контейнерных терминалов в современных условиях // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : сб. тр. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Москва, 2022. С. 96–104.
8. Formation of new principles and models of operation of structural units of the industry under the conditions of implementation of digital technologies / D.A. Lysenko, V.A. Olentsevich, N.V. Vlasova et al. // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems MEACS. 2020. Vol. 1064. P. 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012025.
9. Об ограниченных в обороте объектах имущества открытого акционерного общества «Российские железные дороги» : постановление Правительства РФ от 06.02.2004 № 57 ( в ред. 29.07.2020). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901887461> (дата обращения 18.03.2022).

10. Белова А.Г., Ганеев М.Ф., Никитинский В.Н. Федеральный железнодорожный транспорт России: экономические и правовые вопросы трансформации имущественных прав // Имущественные отношения в РФ. 2002. № 6 (11). С. 3–9.
11. Экономика железнодорожного транспорта / Н.П. Терёшина, В.Г. Галабурда, М.Ф. Трихунков и др. М. : УМЦ ЖДТ, 2006. 801 с.
12. Об особенностях управления и распоряжения имуществом железнодорожного транспорта : федерал. закон от 27.02.2003 № 29-ФЗ (ред. от 23.11.2020). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901853053> (дата обращения 18.03.2022).
13. Фридман Дж., Ордуэй Ник. Анализ и оценка приносящей доход недвижимости. М. : Дело, 1997. 480 с.
14. Коланьков С.В., Ткачук М.Е. Особенности оценки недвижимости объектов железнодорожного транспорта // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов : материалы Междунар. конф. СПб., 2003. С. 130–132.
15. Коланьков С.В., Меркушева В.С. Оценка рыночной стоимости и эффективности сделок с недвижимостью железнодорожного транспорта. М. : Маршрут, 2006. 277 с.
16. Шкурина Л.В. Методология формирования конкурентоспособной экономической стратегии железнодорожного транспорта : автореф. ... д-ра экон. наук. М., 2004. 48 с.
17. Оценка недвижимости / А.Г. Грязнова, А.М. Федотова, А.Л. Артёменков и др. М. : Финансы и статистика, 2007. 560 с.
18. Оленцевич В.А., Асташков Н.П. Методы привлечения клиентов к услугам транспортно-логистического бизнеса в целях увеличения конкурентоспособности холдинга ОАО «РЖД» // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы конф. Иркутск, 2019. Т. 1. С. 4–8.
19. Индикаторы рынка недвижимости : сайт. URL: <https://www.irn.ru/> (Дата обращения: 10.02.2022).
20. Волков Б.А. Экономическая эффективность инвестиций на железнодорожном транспорте в условиях рынка. М. : Транспорт, 1996. 191 с.
21. Экономика железнодорожного транспорта и строительства / Г.Н. Жинкин, В.В. Бабич, И.И. Зеликович и др. М. : Транспорт, 1983. 397 с.

### References

1. Strategiya razvitiya Kholdinga «RZHD» na period do 2030 goda (Elektronnyy resurs) [Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030 (Electronic resource)]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=804> (Accessed February 10, 2022).
2. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]. Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed February 10, 2022).
3. Vostochnyi polygon (Elektronnyi resurs) [Eastern polygon (Electronic resource)]. Available at: [https://gudok.ru/content/sujet/eastern\\_polygon/1180731/](https://gudok.ru/content/sujet/eastern_polygon/1180731/) (Accessed February 10, 2022).
4. Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Otsenka udovletvorennosti kachestvom uslug gruzovykh zheleznodorozhnykh perevozok [Assessment of satisfaction with the quality of freight rail transportation services]. Sovremennye tekhnologii i nauchno-tehnicheskii progress [Modern technologies and scientific and technical progress]. 2021, no 8, pp. 187–188.
5. Bulokhova T.A., Kolosov I.V. Aktual'nye problemy material'no-tehnicheskogo obespecheniya na zheleznodorozhnom transporte [Actual problems of material and technical support in railway transport]. Sbornik nauchnykh statey VII mezdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razvitiye ekonomicheskoi nauki na transporte: ekonomicheskaya osnova budushchego transportnykh sistem» [Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference «Development of economic science in transport: the economic basis of the future of transport systems»]. Saint Petersburg, 2019, pp. 139 – 146.
6. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 30.09.2018 g. № 2101-р, «Ob utverzhdenii Kompleksnogo plana modernizatsii i rasshireniya magistral'noi infrastruktury na period do 2024 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation no 2101-r dated September 30, 2018 «On approval of the Comprehensive Plan for Modernization and Expansion of the trunk infrastructure for the period up to 2024»].
7. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Neobkhodimost' razrabotki novykh proektnykh reshenii po rekonstruktsii konteinernykh terminalov v sovremennykh usloviyakh [The need to develop new design solutions for the reconstruction of container terminals in modern conditions]. Sbornik trudov nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezdunarodnym uchastием «Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte» [Proceedings of the scientific and practical conference with international participation «Innovative technologies in railway transport»]. Moscow, 2022, pp. 96-104.
8. Lysenko D.A., Olentsevich V.A., Vlasova N.V., Konyukhov V.Yu. Formation of new principles and models of operation of structural units of the industry under the conditions of implementation of digital technologies // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems MEACS 2020. Vol. 1064, pp. 012025.
9. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 06.02.2004 no 57 «Ob ogranicennykh v oborote ob"ektakh imushchestva otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Rossiiskie zheleznye dorogi» (red. 29.07.2020) [Decree of the Government of the Russian Federation no 57, dated February 6, 2004 «On limited-circulation objects of Property of JSC «Russian Railways» (ed. July 29, 2020)].
10. Belova A.G., Ganeev M.F., Nikitinskii V.N. Federal'nyi zheleznodorozhnyi transport Rossii: ekonomicheskie i pravovye voprosy transformatsii imushchestvennykh prav [Federal Railway Transport of Russia: economic and law issues of transformation of property rights]. Imushchestvennye otnosheniya v RF [Property relations in the Russian Federation]. 2002, no 6 (11), pp. 3 – 9
11. Tereshina N.P., Galaburda V.G., Trikhunkov M.F. etc. Ekonomika zheleznodorozhного transporta [Economics of railway transport]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 2006. 801 p.
12. Federal'nyi zakon ot 27.02.2003 N 29-FZ «Ob osobennostyakh upravleniya i rasporyazheniya imushchestvom zheleznodorozhного transporta» (red. of 23.11.2020) [Federal Law no 29-FL dated February 27, 2003 «On the Specifics of Management and Disposal of Railway Transport Property» (ed. November 23, 2020)].

13. Friedman J.P., Ordway N. Analiz i otsenka prinosyashchei dokhod nedvizhimosti [Income property appraisal and analysis]. Moscow: Delo, 1997. 480 p.
14. Kolankov S.V., Tkachuk M.E. Osobennosti otsenki nedvizhimosti ob'ektov zheleznodorozhного transporta [Features of real estate valuation of railway transport facilities. In the materials of the international conference]. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii «Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii transportnykh ob'ektov»* [Proceedings of International Conference «Modern problems of design, construction and operation of transport facilities»]. Saint Petersburg, 2003, pp. 130-132.
15. Kolan'kov S.V., Merkusheva V.S. Otsenka rynochnoi stiimosti i effektivnosti sdelok s nedvizhimost'yu zheleznodorozhного transporta [Evaluation of the market value and efficiency of real estate transactions of railway transport]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 277 p.
16. Shkurina L.V. Metodologiya formirovaniya konkurentosposobnoi ekonomiceskoy strategii zheleznodorozhного transporta [Methodology for the formation of a competitive economic strategy of the railway transport]. Doctor's thesis, Moscow, 2004, 48 p.
17. Gryaznova A.G., Fedotova A.M., Artemenkov A.L., etc. Otsenka nedvizhimosti [Real Estate Valuation]. Moscow: Finansy i statistika Publ., 2007, 560 p.
18. Olentsevich V.A., Astashkov N.P. Metody privlecheniya klientov k uslugam transportno-logisticheskogo biznesa bloka v tselyakh uvelicheniya konkurentosposobnosti kholdinga OAO «RZHD» [Methods of attracting customers to the services of the transport and logistics business block in order to increase the competitiveness of the holding of JSC «Russian Railways»]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. 2019, Vol. 1, pp. 4-8.
19. Indikatory rynka nedvizhimosti (Elektronnyi resurs) [Real estate market indicators (Electronic resource)]. Available at: IRN.RU (Accessed February 10, 2022).
20. Volkov B.A. Ekonomicheskaya effektivnost' investitsii na zheleznodorozhnom transporte v usloviyakh rynka [Economic efficiency of investments in railway transport in market conditions]. Moscow: Transport Publ., 1996. 191 p.
21. Zhinkin G.N., Babich V.V., Zelikovich I.I., etc. Ekonomika zheleznodorozhного transporta i stroitel'stva [Economics of railway transport and construction]. Moscow: Transport Publ., 1983. 397 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

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

### Information about the authors

**Viktoriya A. Olentsevich**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment «Operation Management», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olencevich\_va@mail.ru

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



## РУШ ЕЛЕНА АНАТОЛЬЕВНА

Доктор технических наук, профессор

Елена Анатольевна родилась 1 августа 1963 года. В 1980 году с отличием окончила школу и поступила в Иркутский политехнический институт, а в 1985 году стала инженером-строителем по специальности «Водоснабжение и канализация».

По окончании института Елена Анатольевна начинает заниматься наукой и 11 марта 1994 года успешно защищает кандидатскую диссертацию, а еще через два года ей присваивается ученое звание доцент. В 2005 году, продолжая заниматься проблемами экологии, она становится доктором технических наук, а в 2007 году получает звание профессора.

В 2005 году Елена Анатольевна начинает работать в Иркутском государственном университете путей сообщения, сначала профессором кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экологии» (сейчас это кафедра «Техносферная

безопасность»), а с 2007 года становится ее бессменным руководителем.

Е.А. Руш является действительным членом Международной академии наук по экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ), а также академическим советником Академии водохозяйственных наук.

Е.А. Руш является членом Диссертационного совета Д003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки институте геохимии имени А.П. Виноградова СО РАН. Она автор более 300 научных и научно-методических работ, а также имеет патенты на способы в научном направлении по обоснованию принципов и разработке методов инженерной защиты окружающей среды, прогнозирования, предупреждения и ликвидации последствий загрязнения природной среды при эксплуатации объектов транспорта. Елена Анатольевна и Университет, в лице возглавляемой ею кафедры, периодически выступают официальным оппонентом и ведущей организацией соответственно, при защите кандидатских диссертаций.

Кроме студентов, у которых Елена Анатольевна проводит все виды занятий и осуществляет руководство ВКР и НИР, она преподает аспирантам дисциплины, связанные с научным исследованием экологического состояния природной биосфера, а также дисциплины по защите окружающей среды в чрезвычайных ситуациях на железнодорожном транспорте и в промышленности. Еленой Анатольевной подготовлено более десяти кандидатов и докторов наук. Еще Елена Анатольевна руководит иностранными аспирантами, поддерживает тесные связи с монгольскими и китайскими вузами.

Под ее руководством планомерно реализуется программа международного сотрудничества между университетами Китайской народной республики (Университет Наньчань и Тяньзыньский государственный университет науки и технологий) и ИрГУПС в направлении академического и образовательного партнерства по тематике экологической направленности.

В рамках рассмотрения вопросов новой концепции экологического состояния Байкальской территории, Елена Анатольевна внесла значимый вклад в разработку рекомендаций и дополнений.

Е.А. Руш принимает постоянное участие в работах по проведению экологической комплексной оценки Кодарского и Северомуйского тоннелей Байкало-Амурской магистрали.

За заслуги в развитии науки, многолетний добросовестный труд, профессиональное мастерство Елена Анатольевна награждена различными почетными грамотами и благодарностями от Министерства образования РФ, Губернатора Иркутской области, мэра г. Иркутска, ректора ИрГУПС и др.

Современные технологии  
Системный анализ  
Моделирование

№ 1 (73)

2 0 2 2

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор А.П. Хоменко  
Ответственный за выпуск В.В. Гасельник

Подписано в печать 07.03.2022. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 31.03.2022

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 25

Уч.-изд. л. 24,18. Тираж 500 экз. Заказ № 3603

Подписной индекс по каталогу «Урал-Пресс»: 64556

ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН.

Сведения о журнале ежегодно

публикуются в международной справочной системе

по периодическим и продолжающимся изданиям

«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01

Маркировка информационной продукции - не маркируется

Цена свободная

Адрес редакции, издательства и типографии

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения

Телефон: 8(3952) 63-83-89, E-mail: [stsam@irgups.ru](mailto: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)