

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

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



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

Подписной индекс  
в каталоге «Урал-Пресс» – 64556

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

Modern technologies.  
System analysis. Modeling

2022 № 2(74)  
No. 2(74)

Современные технологии.  
Системный анализ. Моделирование

ISSN 1813-9108 (Print)

# Современные технологии Системный анализ Моделирование

2022  
№ 2 (74)

Иркутский государственный  
университет путей сообщения

Машиностроение • Машиноведение • Энергетические системы • Транспорт



Д.Т.Н., профессор

**ДАНЕЕВ АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ**

Математическое моделирование процессов и объектов различной природы, в т.ч. транспортных средств с динамическим принципом поддержания, а также динамики летательных аппаратов и систем их управления

# Modern technologies System analysis Modeling

2022  
No. 2 (74)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

Machine Building • Theoretical Engineering • Energy Systems • Transport

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

**№ 2 (74)**

**2 0 2 2**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Главный редактор **А.П. Хоменко**  
Ответственный за выпуск **Д.В. Буторин**

---

#### Приоритетные цели журнала

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

#### Стратегические задачи

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

#### Учредитель и издатель

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

#### Главный редактор

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

#### Заместитель главного редактора

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

#### Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Телефон:** +7(3952) 63-83-57; **Факс:** +7(3952) 38-76-72

**Сайт:** <http://ojs.irgups.ru>

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

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

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

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

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

# Modern technologies System analysis Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)

2022  
No. 2 (74)

Founded in 2004

Published quarterly

## Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

### Aims and Scope

- transfer of knowledge and experience gained by the world community and schools of thought of the university;
- development of new knowledge in the field of mechanics; mechanical engineering; computer science; transport to solve topical problems of modern technology;

- acquaint the readers with the world's best practices in the implementation of scientific developments in technical sciences.
- provide scientists with an opportunity to publish the results of their researches;
- attract attention to the most relevant and promising areas of research on the subject of the journal;
- exchange of opinions between researchers from different regions and states.

### Founder and publisher

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

### Editor-in-Chief

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

### Deputy Editor-in-Chief

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

### Editorial council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Tel.:** +7(3952) 63-83-57; **Fax:** +7(3952) 38-76-72

**Web-Site:** <http://ojs.irgups.ru>

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

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

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

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

The journal is included in the list of leading scholarly journals

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

- Mechanical engineering and mechanical science;
- Transport.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Машиностроение, машиноведение и энергетические системы**

Данеев А.В., Данеев Р.А., Сизых В.Н. Исследование уравнений вентильного генератора на жесткость .....	10
Дудаев М.А., Немитовская Д.В., Верянская А.Э. Моделирование динамического поведения бруса при повторно-переменных нагрузках в лабораторных условиях .....	22
Нехаев В.А., Николаев В.А., Леоненко Е.Г. Введение во фракционный анализ сингулярных («жестких») систем дифференциальных уравнений, представляющих материальные объекты железнодорожного транспорта .....	33
Потапенков А.П., Пилипенко С.С. Разработка и исследование двухцилиндрового многоступенчатого насосного гидропривода технологических машин .....	47

**Транспорт**

Лагерев С.Ю., Карпов И.Г., Насников Д.Н., Асалханова Т.Н. Комплексное решение постановки плана железнодорожного пути в проектное положение .....	58
Мартыненко Л.В. Применение демодуляции при оценке технического состояния подшипников .....	69
Алексеева Т.Л., Рябченков Н.Л., Астраханцев Л.А., Тихомиров В.А., Михальчук Н.Л., Мартусова С.А. Системный анализ технологии энергетического обеспечения тяги поездов .....	80
Корсун А.А., Иванов П.Ю., Осипов Д.В., Тихонов Д.А. Анализ факторов, влияющих на коэффициент трения тормозной колодки подвижного состава .....	91
Портной А.Ю., Селедцов К.П., Мельниченко О.В., Мищенко М.В. Оценка влияния системы охлаждения электровоза и параметров движения поезда на трещинообразование в остовах тягового электродвигателя НБ-514 .....	101
Коваленко Н.И., Коваленко Н.А. Факторы повышения современного уровня технического состояния железнодорожной инфраструктуры .....	112
Гришкова Д.Ю., Тесленко И.О. Логистические схемы доставки скоропортящихся грузов .....	121
Пригожаев С.С., Пыхалов А.А., Бурмакин Н.О. Анализ влияния характеристик гидравлического гасителя колебаний на напряженно-деформированное состояние тележки пассажирского вагона .....	130
Матяш Ю.И., Родченко А.Д., Корнилович А.П. Разработка методов и современных технических средств, обеспечивающих безопасные условия перевозки пассажиров в период пандемии коронавируса Covid-19 .....	142
Воронина Е.В., Крюков А.В., Степанов А.Д., Фесак И.А. Моделирование режимов компактных линий электропередачи, питающих тяговые подстанции .....	151
Власова Н.В., Оленцевич В.А. Этапы формирования маркетинговой стратегии управления терминально-складским комплексом ОАО «Российские железные дороги» с целью достижения максимальных результатов продвижения транспортных услуг и привлечения клиентов .....	163

<b>Полтавская Ю.О., Гозбенко В.Е.</b> Анализ факторов, оказывающих влияние на развитие интеллектуальных транспортных систем в субъектах Российской Федерации .....	175
--	-----

### **Информационные технологии, управление и обработка**

<b>Асламова В.С., Кузнецова П.А., Асламов А.А.</b> Анализ показателей травматизма в 2020 и 2021 г. на иркутских автодорогах общего пользования .....	188
--	-----

<b>Великанов В.С., Дёрина Н.В., Панфилова О.Р.</b> Методы искусственного интеллекта в оценке степени износа футеровочной брони конусных дробилок .....	202
--	-----

### **Персоналии**

Д.т.н., профессор Данеев А.В. ....	212
------------------------------------	-----

## CONTENTS

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

<b>Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N.</b> The study of the equations of the valve generator for stiffness .....	10
<b>Dudaev M.A., Nemitovskaya D.V., Veryanskaya A.E.</b> The bar dynamic behavior simulation by repeatable loading at the laboratory conditions .....	22
<b>Nekhaev V.A., Nikolaev V.A., Leonenko E.G.</b> Introduction to fractional analysis of singular («rigid») systems of differential equations representing material objects of railway transport .....	33
<b>Potapenkov A.P., Pilipenko S.S.</b> Development and research of two-cylinder multi-stage pumping hydraulic drive of technological machines .....	47

**Transport**

<b>Lagerev S.Yu., Karpov I.G., Nasnikov D.N., Asalkhanova T.N.</b> A comprehensive solution for setting the railway track plan in the design position .....	58
<b>Martynenko L.V.</b> Using demodulation in assessment of the technical condition of bearings .....	69
<b>Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Mikhail'chuk N.L., Martusova S.A.</b> A comprehensive solution for setting the railway track plan in the design position .....	80
<b>Korsun A.A., Ivanov P.Yu., Osipov D.V., Tikhonov D.A.</b> Analysis of factors affecting the brake pad friction coefficient of rolling stock .....	91
<b>Portnoi A.Yu., Seledtsov K.P., Melnichenko O.V., Mishchenkov M.V.</b> Evaluation of the influence of the cooling system of an electric locomotive and the parameters of train movement on cracking in the frame of the NB-514 traction motor .....	101
<b>Kovalenko N.I., Kovalenko N.A.</b> Factors of increasing the current level of technical condition of the railway infrastructure .....	112
<b>Grishkova D.Yu., Teslenko I.O.</b> Logistics schemes for the delivery of perishable goods .....	121
<b>Prigozhaev S.S., Pykhalov A.A., Burmakin N.O.</b> Analysis of the influence of the hydraulic vibration damper characteristics on the stress-strain state of the passenger car trolley .....	130
<b>Matyash Yu.I., Rodchenko A.D., Kornilovich A.P.</b> Development of methods and modern technical means ensuring safe transportation of passengers in the conditions of the Covid-19 coronavirus pandemic .....	142
<b>Voronina E.V., Kryukov A.V., Stepanov A.D., Fesak I.A.</b> Modeling the modes of compact transmission lines feeding traction substations .....	151
<b>Vlasova N.V., Olentsevich V.A.</b> Stages of forming a marketing strategy for managing the terminal and warehouse complex of JSC «Russian Railways» in order to achieve maximum results in promoting transport services and attracting customers .....	163

<b>Poltavskaya Ju.O., Gozbenko V.E.</b> Analysis of factors influencing the development of intelligent transport systems in regions of Russian Federation .....	175
---	-----

### **Information technology, management and processing**

<b>Aslamova V.S., Kuznetsova P.A., Aslamov A.A.</b> Analysis of injury indicators in 2020 and 2021 in Irkutsk public highways .....	188
---	-----

<b>Velikanov V.S., Derina N.V., Panfilova O.R.</b> Artificial intelligence methods in assessing the degree of wear of the lining armor of cone crushers .....	202
---	-----

### **Personalities**

Doctor of Engineering Science, Full Professor A.V. Daneev .....	212
---	-----



**Требования к статьям, принимаемым к публикации**

Рукописи статей представляются в электронном и распечатанном виде.

Рекомендуемый объем статей 9-12 стр.

1. К статье прилагается:

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

2. Статья включает в себя:

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

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

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

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

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

При вставке формул использовать только Microsoft Equation 3 с параметрами:

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

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

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

Статьи, представляемые в журнал, проходят обязательное рецензирование.

Самоцитирование журнала в статьях **запрещено**.

Пример оформления статьи представлен на сайте журнала: ojs.irgups.ru

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

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

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

Иркутский государственный университет путей сообщения. Аудитория Г-304. Каимов Евгений Витальевич.

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

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МАШИНОВЕДЕНИЕ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

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

## Исследование уравнений вентильного генератора на жесткость

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, Российская Федерация

<sup>2</sup>Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск, Российская Федерация

✉daneev@mail.ru

### Резюме

При анализе нелинейных и нестационарных уравнений вентильной машины все более остро встает проблема обоснованного выбора метода численного интегрирования, обеспечивающего адекватность получаемых при численном эксперименте результатов истинному решению кусочно-линейных уравнений состояния канонического или нормального вида. Цель статьи состоит в обосновании при выборе метода численного интегрирования целесообразности проведения исследования уравнений вентильного генератора на жесткость и объяснении физического смысла данного явления при моделировании любой синхронной машины. Жесткость уравнений, описывающих электрические цепи, – скорее правило, чем исключение. Кроме того, электромагнитные процессы вентильного генератора описываются функциями состояния, характер поведения различных участков которых также свидетельствует о возможном разделении на «быстрые» (с большими производными) и «медленные» (с малыми производными) компоненты. Однако, если при анализе электромеханических процессов разделению подлежат разные функции (процессы), то при исследовании электромагнитных процессов приходится говорить о разделении функций одного и того же процесса, а также каждой из них. Электромагнитные процессы, ввиду наличия в электромеханической системе вентильного звена с резко выраженными ключевыми свойствами полупроводниковых элементов, характеризуются существованием в произвольный момент времени разнотемповых функций – токов вентилей. В момент переключения с одного вентиля на другой происходит нарушение непрерывности (коммутации) токов в ключевых элементах вентильного генератора. Затем проводится очередной вентиль до тех пор, пока не наступит следующая коммутация, и т. д. Предложенный в работе подход позволяет исследовать уравнения вентильного генератора на жесткость.

### Ключевые слова

вентильный генератор, уравнение состояния, жесткость уравнений, метод численного интегрирования, кусочно-линейные уравнения

### Для цитирования

Данеев А.В. К исследованию уравнений вентильного генератора на жесткость / А.В. Данеев, Р.А. Данеев, В.Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2(74). – С. 10–21. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).10-21.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 29.04.2022 г.; поступила после рецензирования: 31.05.2022 г.; принята к публикации: 31.05.2022 г.

## The study of the equations of the valve generator for stiffness

A.V. Daneev<sup>1</sup>✉, R.A. Daneev<sup>2</sup>, V.N. Sizykh<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

When analyzing nonlinear and non-stationary equations of a valve machine, the problem of a reasonable choice of a numerical integration method ensuring the adequacy of the results obtained in a numerical experiment to the true solution of piecewise linear equations of state of a canonical or normal form becomes increasingly acute. The purpose of the article is, when choosing a method of numerical integration, to substantiate the expediency of studying the equations of a valve generator for stiffness and explaining the physical meaning of the phenomenon when modeling any synchronous machine. The rigidity of the equations describing electrical circuits is a rule rather than an exception. In this case, the phenomenon of rigidity is associated with the existence of «fast» and slowly changing functions of the state variables of the circuits. Besides, the electromagnetic processes of the VG are described by state functions, the behavior of various parts of which also indicates a possible division into «fast» (with large derivatives) and «slow» (with small derivatives) components. However, while in the analysis of electromechanical processes different functions (processes) are subject to separation, in the study of electromagnetic processes one has to deal with the separation of the functions of one and the same process, as well as of each function. Electromagnetic processes, due to the presence in the electromechanical system of a valve link with pronounced key properties of semiconductor elements, are characterized by the existence at an arbitrary moment of time of different-tempo functions - valve currents. At the moment of switching

from one valve to another, there is a violation of the continuity (switching) of currents in the key elements of the valve generator. Then it starts to conduct the next gate until the next commutation occurs, and so on. The approach proposed in the work makes it possible to study the equations of the valve generator for stiffness.

### Keywords

valve generator, equation of state, rigidity of equations, numerical integration method, piecewise linear equations

### For citation

Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N. Issledovanie uravnenii ventil'nogo generatora na zhestkost' [The study of the equations of the valve generator for stiffness]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2(74), pp. 10–21. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).10-21.

### Article Info

Received: April 29, 2022; revised: May 31, 2022; accepted: May 31, 2022.

### Введение

В настоящее время при анализе нелинейных и нестационарных уравнений вентиляльной машины все более остро встает проблема обоснованного выбора метода численного интегрирования, обеспечивающего адекватность получаемых при численном эксперименте результатов истинному решению кусочно-линейных уравнений состояния канонического вида

$$L_1^*(t) \cdot \frac{di^*}{dt} = f_1^*(i^*, t) \quad (1)$$

или нормального вида [1]

$$\frac{di^*}{dt} = f^*(i^*, t), \quad (2)$$

где

$$f_1^*(i^*, t) = A_1(i^*, t) \cdot i^* + B_1(i^*, t) \cdot e_M;$$

$$f^*(i^*, t) = A(i^*, t) \cdot i^* + B(i^*, t) \cdot e_M;$$

$$A(i^*, t) = L_1^{*-1}(t) \cdot A_1(i^*, t); \quad B(i^*, t) = L_1^{*-1}(t) \cdot B_1(i^*, t);$$

$$t_S < t \leq t_{S+1}; \quad i^*(t_S) = i_{S0}^*; \quad S = 0, k; \quad t_{KOH} = t_K.$$

Здесь  $t_S$  – время последнего момента включения вентиля;  $t_{S+1}$  – время последующего момента включения, когда проходящий через любой вентиль ток меняет направление;  $A_1(i^*, t) = A_1(i, t)_{/t_S < t < t_{S+1}}$  – матрица коэффициентов при векторе состояния размерности  $m \times m$  ( $m$  – число независимых контуров направленного графа [1]);  $B_1(i^*, t) = B_1(i, t)_{/t_S < t < t_{S+1}}$  – матрица коэффициентов при векторе ЭДС  $e_M$ , индуцируемых постоянным магнитом, размерности  $m \times m_r$  ( $m_r$  – число фаз генератора);  $L_1^*(t) = L_1(t)_{/t_S < t < t_{S+1}}$  – постоянная положительно определенная на интервале  $t_S < t \leq t_{S+1}$  матрица индуктивностей размерности  $m_r \times m_r$ ;  $i^* = i(t)_{/t_S < t < t_{S+1}}$  – вектор состояния системы (1) или (2) размерности  $m \times 1$ .

При этом основным критерием адекватности решения (1) или (2) является удовлетворение выбранного метода требованиям по точности и устойчивости вычислений.

Проведенный анализ классических методов численного интегрирования позволяет сделать следующие выводы:

1. Не существует асимптотически устойчивых ( $A$ -устойчивых) многошаговых явных численных методов [2].

2. Не доказано существование  $A$ -устойчивого неявного многошагового метода численного интегрирования порядка выше второго (кроме неявного метода Эйлера и метода трапеций).

3. С увеличением порядка численного метода повышается локальная точность вычислений.

4. Выполнение численного решения уравнений вентиляльного генератора (ВГ) с приемлемыми вычислительными затратами позволяет использовать только неявные методы, которые являются жестко устойчивыми (кроме методов первого и второго порядков).

5. Удовлетворить в полной мере адекватности получаемого решения истинному позволяют системные методы Ю.В. Ракитского [3].

### Постановка задачи

Цель настоящей статьи состоит в обосновании при выборе метода численного интегрирования целесообразности проведения исследования уравнений ВГ на жесткость [3] и объяснении физического смысла данного явления при моделировании любой синхронной машины.

Жесткость уравнений, описывающих электрические цепи, – скорее правило, чем исключением [3]. При этом явление жесткости

связывается с существованием быстро и медленно изменяющихся функций переменных состояния цепей.

Предварительный анализ свойств жесткости уравнений ВГ показал, что в такой электромеханической системе существует своя специфика в определении данных свойств:

1. Возможно явное разделение функций электромеханических процессов на «быстрые» (переменные состояния, характеризующие электромагнитные процессы) и «медленные» – монотонно изменяющиеся (движение ротора электрической машины) функции с существенно различными временными характеристиками [4].

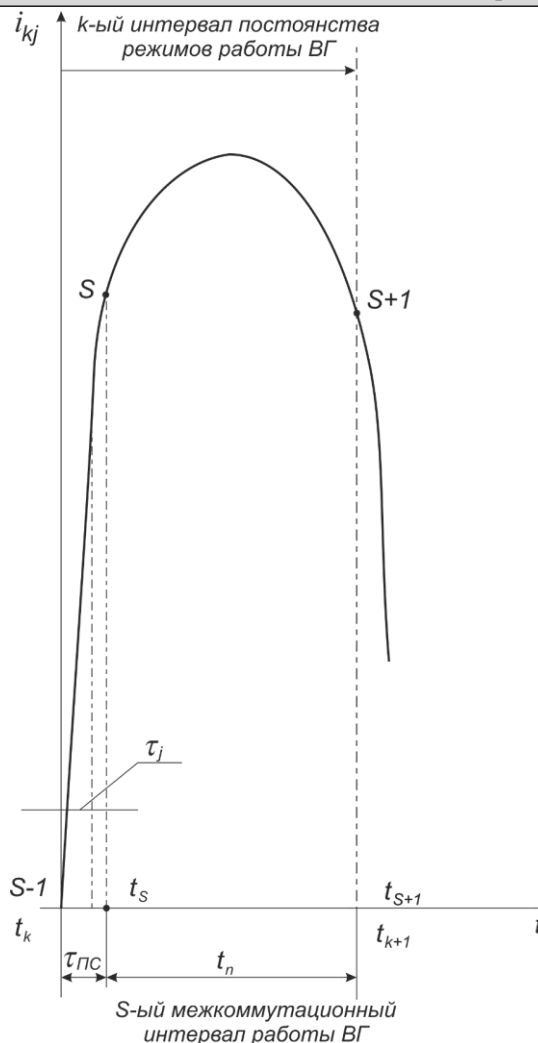
2. Электромагнитные процессы ВГ описываются функциями состояния, характер поведения различных участков которых также свидетельствует о возможном разделении на «быстрые» (с большими производными) и «медленные» (с малыми производными) компоненты. Однако, если при анализе электромеханических процессов разделению подлежат разные функции (процессы), то при исследовании электромагнитных процессов приходится говорить о разделении функций одного и того же процесса, а также каждой из них. Последнее обстоятельство вызвано следующими причинами:

– уравнения электрических машин содержат периодические коэффициенты (их решения – периодические функции времени);

– вентильные преобразователи (ВП) характеризуются явно выраженными ключевыми свойствами вентиля, моменты естественной коммутации которых заранее неизвестны (рис. 1);

– зависимость моментов переключения вентиля от параметров генератора и нагрузки всегда требует предварительного, зачастую довольно сложного анализа работы ВП при использовании переменной структуры уравнений ВГ, что может привести к неадекватности получаемого численного решения результатам экспериментальных исследований.

Следовательно, встает задача программного разделения отдельных участков одной и той же функции, описывающей электромагнитные процессы ВГ, на основе обоснованно выбранного метода численного интегрирования.



**Рис. 1.** Кривая тока через вентиль, поясняющая разнотемповость его производной  
**Fig. 1.** A current-through-valve curve illustrating the different-tempo character of its derivative

С помощью явных численных методов не представляется возможным решение данной задачи. Так, выполненное на основе методов Рунге-Кутты и Эйлера исследование уравнений синхронного генератора с периодическими коэффициентами, показало, что при интегрировании данных уравнений затраты машинного времени в 13–14 раз больше, чем при расчете преобразованных уравнений с постоянными коэффициентами в осях  $d$ ,  $q$ ,  $0$  и в приведенных фазных координатах [5], когда реальные быстро осциллирующие процессы заменялись огибающими этих процессов. Первые попытки применения явных численных методов к моделированию уравнений ВГ не позволили вообще получить решения ввиду чрезмерно малого шага интегрирования (порядка  $10^{-15}$ – $10^{-20}$  с.).

### Исследование уравнений вентильного генератора на жесткость

Рассмотрим физическое содержание явления жесткости уравнений (1) и (2) ВГ согласно поставленной задаче.

Исследования показали, что при моделировании предпосылками явления жесткости являются две причины:

– малые (порядка  $10^{-3}$ – $10^{-6}$  Гн) значения периодически изменяющихся индуктивных коэффициентов в матрице  $L_1^*(t)$  при первых производных (1);

– большой разброс постоянных времени в правой части (1) из-за резко выраженных ключевых свойств вентилей.

Следствием малых значений индуктивных коэффициентов является плохая обусловленность матрицы  $L_1^*(t)$ . Большой разброс постоянных времени определяется принятой RL-моделью вентилей с большим обратным сопротивлением, отличающимся на 5–7 порядков от прямого.

При аппроксимации нестационарных коэффициентов матриц  $L_1^*(t)$  и  $A_1$  в уравнениях (1) кусочно-постоянными на  $k$ -ом шаге интегрирования получим:

$$L_{1k} \cdot \frac{di^*}{dt} = f_{1k}, \quad (3)$$

где  $L_{1k} = L_1^*(t)_{t_k < t \leq t_{k+1}}$ ,  $f_{1k} = f_1^*(i^*, t)_{t_k < t \leq t_{k+1}}$ .

Для определения достоверности решения алгебраического матричного уравнения (3) (если принять  $x = \frac{di^*}{dt}$ ) необходимо найти оценку чувствительности данного решения к малым изменениям параметров векторной функции  $\frac{d(\Delta i^*)}{dt}$ .

Возмущение в правой части (3) на  $\Delta f_{1k}$  приведет к изменению решения на  $\frac{d(\Delta i^*)}{dt}$ :

$$L_{1k} \left( \frac{di^*}{dt} + \frac{d(\Delta i^*)}{dt} \right) = f_{1k} + \Delta f_{1k}. \quad (4)$$

Вычитая из уравнения (4) выражение (3), получим

$$L_{1k} \left( \frac{d(\Delta i^*)}{dt} \right) = \Delta f_{1k} \quad \text{или} \quad \frac{d(\Delta i^*)}{dt} = L_{1k}^{-1} \cdot \Delta f_{1k}. \quad (5)$$

Для того чтобы сравнить относительное изменение  $\|\Delta f_{1k}\| / \|f_{1k}\|$  с относительной погрешностью решения  $\left\| \frac{d(\Delta i^*)}{dt} \right\| / \left\| \frac{di^*}{dt} \right\|$ , запишем норму матрицы  $L_{1k}$ :

$$\|L_{1k}\| = \max_{\frac{di^*}{dt} \neq 0} \frac{\left\| L_{1k} \frac{di^*}{dt} \right\|}{\left\| \frac{di^*}{dt} \right\|},$$

ограничивающую «степень возрастания» [6] при умножении на матрицу  $L_{1k}$

$$\left\| L_{1k} \cdot \frac{di^*}{dt} \right\| \leq \|L_{1k}\| \cdot \left\| \frac{di^*}{dt} \right\|$$

для любого вектора производных токов  $\frac{di^*}{dt}$ , не равного нулю.

Из последнего неравенства следует

$$\|f_{1k}\| \leq \|L_{1k}\| \cdot \left\| \frac{di^*}{dt} \right\|.$$

Аналогичным образом, используя понятие нормы матрицы из уравнения (5) запишем:

$$\|L_{1k}\| = \max_{\Delta f_{1k} \neq 0} \frac{\left\| L_{1k}^{-1} \Delta f_{1k} \right\|}{\|\Delta f_{1k}\|},$$

откуда следует  $\left\| \frac{d(\Delta i^*)}{dt} \right\| / \left\| \frac{di^*}{dt} \right\| \leq k(L_{1k})$ ,

где  $k(L_{1k}) = \|L_{1k}\| \cdot \|L_{1k}^{-1}\|$  – число обусловленности матрицы  $L_{1k}$ .

Точно таким же способом проводится оценка чувствительности решения уравнений (1) и (2)

$$A_1(i^*, t) \cdot i^* = C(t), \quad C(t) = L_1^*(t) \frac{di^*}{dt} - B_1(i^*, t) \cdot e_M;$$

$$A(i^*, t) \cdot i^* = D(t), \quad D(t) = \frac{di^*}{dt} - B(i^*, t) \cdot e_M.$$

к возмущениям в правой части  $\Delta C(t)$  и  $\Delta D(t)$  через числа обусловленности матриц  $A_1$  и  $A$  на  $k$ -ом интервале интегрирования  $t_k < t \leq t_{k+1}$ :

$$k(A_{1k}) = \|A_{1k}\| \cdot \|A_{1k}^{-1}\|, \quad k(A_k) = \|A_k\| \cdot \|A_k^{-1}\|. \quad (6)$$

Первое формальное определение жестких систем дифференциальных уравнений (ДУ) следует из вычисления чисел обусловленности матриц  $L_{1k}$ ,  $A_{1k}$  или матрицы  $A_k$ .

Система уравнений ВГ, записанная в канонической форме, считается жесткой, если на  $k$ -ом интервале интегрирования  $k(L_{1k}) \gg 1$  и (или)  $k(A_{1k}) \gg 1$ .

Нормальная система уравнений ВГ вида (2) является жесткой, если

$$k(A_k) \gg 1. \quad (7)$$

Однако остается неясной количественная правдоподобность таких оценок. Так, например, при числах обусловленности  $k(A_k) = 100$  и  $k(A_k) = 20\,000$  одинаково приходится говорить о свойствах жесткости системы (2).

Таким образом, по существу, такой подход означает попытку установить причинно-следственную связь между свойствами обусловленности матриц и жесткости систем (1) или (2).

Остановимся более детально на оценке свойств жесткости системы ДУ в нормальной форме (2). Как известно, такая форма представления уравнений ВГ требует применения явных методов численного интегрирования. Недостатком традиционно используемых явных методов является последовательная пошаговая организация вычислительной процедуры определения приращения вектора состояния. При численном интегрировании предположительно жесткой системы ДУ (2), в силу существования в произвольный момент времени при любых коммутациях вентилей больших производных токов для получения устойчивого численного решения возникает необходимость задавать малые приращения вектора состояния. Это, в свою очередь, при принятой организации численных расчетов, приводит к очень малому шагу интегрирования. При любом превышении шага величины минимальной постоянной времени цепи  $\tau_{\min} = \min_j(\tau_j)$  наблюдается числен-

ная неустойчивость решения – «взрыв» погрешности [3]. Поэтому для решения на электронной вычислительной машине (ЭВМ) системы уравнений (2) необходимо предварительно рассмотреть задачу обоснованного выбора шага интегрирования на основе достоверной количественной оценки свойств жесткости уравнений ВГ, а также задачу рациональной организации вычислительных процедур с целью обеспечения приемлемых затрат машинного времени при имитационном моделировании.

Более конкретная количественная оценка уравнений (2) получается из предварительного

качественного анализа электромагнитных процессов, протекающих в ВГ.

Электромагнитные процессы ввиду наличия в электромеханической системе вентильного звена с резко выраженными ключевыми свойствами полупроводниковых элементов характеризуются существованием в произвольный момент времени разнотемповых функций – токов вентилей. В момент переключения с одного вентиля на другой происходит нарушение непрерывности (коммутации) токов в ключевых элементах ВГ. Затем проводится очередной вентиль до тех пор, пока не наступит следующая коммутация.

Таким образом, можно выделить два основных интервала проводимости вентилей: коммутационный и межкоммутационный, причем время протекания коммутационных процессов в ВГ значительно меньше времени, когда коммутация вентилей не происходит.

Двум режимам работы ВГ должны соответствовать и существенно различные поведения процессов численного решения системы (2).

Первому, коммутационному режиму работы ВГ, соответствует участок с быстрым изменением токов вентилей (см. рис. 1).

Именно этот участок определяет существование больших производных решения и минимальных постоянных времени вентильной цепи. Так как участок (К-1) с быстрым изменением переменных состояния как бы отражает стремление токов вентилей перейти во второй, межкоммутационный режим работы ВГ, то такой участок называют пограничным слоем [3]. Интервал времени, соответствующий длительности пограничного слоя, принимаем равным минимальной постоянной времени цепи:

$$\tau_{ПС} \hat{=} \tau_{\min} = \min_j(\tau_j), \quad (\tau_{ПС} < \tau_{\min}).$$

Второй участок изменения токов вентилей характеризуется малыми производными при решении уравнений (2) и достаточно большой, доступной наблюдению длительностью электромагнитных процессов  $t_{II} = t_{k+1} - t_k$  на  $k$ -ом межкоммутационном интервале работы ВГ. Оценкой длительности процессов на интервале времени  $t_{II}$  (оценкой «сверху») может служить следующее соотношение:

$$t_{II} = \frac{2\pi}{\omega N_{II}},$$

где  $N_{II}$  – число пульсаций выпрямленного напряжения за один период изменения ЭДС источника

питания, определяемое выбранной силовой схемой ВП.

Из приведенных рассуждений и физического содержания, протекающих в ВГ электромагнитных процессов, следует практический критерий определения свойств жесткости системы уравнений (2). Система ДУ ВГ является жесткой, если имеет место следующее неравенство:

$$\tau_{PC} \ll t_H \quad (8)$$

Интервал времени пограничного слоя оценивается следующими выражениями:

$$\tau_{PC} = \|A_K\|^{-1}, \quad (9)$$

$$\tau_{PC} = |tr(A_K)|, \quad (10)$$

где  $\|A_K\|$  – норма матрицы  $A$ , вычисленная на  $k$ -ом интервале непрерывности решения системы

$$(2); tr(A_K) = \sum_{j=1}^m (a_{jj})_K \text{ – след матрицы } A \text{ на том}$$

же интервале численного интегрирования [3].

Выбранному практическому критерию определения свойств жесткости системы уравнений (2) удовлетворяют следующие оценки данных свойств, выражаемые или через коэффициент жесткости [7] на  $k$ -ом интервале «постоянства режимов» (см. рис. 1).

$$K_{ЖИ} = \frac{t_H}{\min_j(\tau_j)} = \frac{t_H}{\tau_{PC}}, \quad (11)$$

или через обобщенный коэффициент жесткости на всем временном интервале работы ВГ

$$K_{Ж0}(t) = \sum_{k=1}^M K_{ЖИ}^k P_k(t). \quad (12)$$

Здесь

$$P_k(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t_k \leq t \leq t_{k+1} \\ 0, & \text{при } t < t_k, t > t_{k+1} \end{cases} \quad \text{– кусочно-}$$

постоянная функция, где  $t_k$  и  $t_{k+1}$  – моменты времени, соответствующие началу и концу интервала постоянства режимов ВГ.

В формуле (11)  $t_H$  и  $\tau_{PC}$  оцениваются по соотношениям (7), (9) или (10) соответственно.

Смысл введения коэффициентов жесткости  $K_{ЖИ}$  и  $K_{Ж0}(t)$  заключается в том, что данные коэффициенты позволяют ответить на вопрос: во сколько раз межкоммутационный интервал работы вентиля (на одном интервале постоянства режимов или в среднем за рассматриваемый промежуток времени) больше интервала пограничного слоя, а, следовательно, косвенно

и на вопрос: на сколько порядков производные токов вентиля в коммутационный интервал больше производных этих токов, когда не происходит переключения с одного вентиля на другой.

Для жесткой системы уравнений вида (2):

$$K_{ЖИ} \gg 1, K_{Ж0}(t) \gg 1.$$

### Пример исследования уравнения вентильного генератора на жесткость

Матричное нелинейное уравнение ВГ (2) в нормальной форме Коши записывается системой кусочно-линейных уравнений, инвариантных на шаге интегрирования к выбранным переменным состояния – токам вентиля [5], если время  $t$  относится к интервалу времени  $t_H$  между соседними коммутациями вентиля (межкоммутационный интервал)

$$t_H = t_{s+1} - t_s = \frac{2\pi}{\omega N_H},$$

т.е.  $t_s < t < t_{s+1}$ , то обозначив вектор тока вентилей на этом интервале  $i_V^*$ , получим:

$$\frac{di_V^*}{dt} = A(i_V^*, t)i_V^* + B(i_V^*, t)e_{mk}, \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} A(i_V^*, t) &= -[L_k + L_V(i_V^*) + KL_H K^T]^{-1} \\ &\left[ R_\phi + R_V(i_V^*) + \left( \frac{dL(t)}{dt} \right)_{t=t_k} + KR_H K^T \right]; \\ B(i_V^*, t) &= [L_k + L_V(i_V^*) + KL_H K^T]^{-1}; \\ e_{mk} &= e_H(t_k), t_k < t \leq t_{k+1}, \\ L_k &= L(t_k), t_k < t \leq t_{k+1} \end{aligned}$$

– кусочно-постоянные на  $k$ -ом интервале интегрирования вектора ЭДС, индуцируемые постоянными магнитами, и матрица индуктивностей и взаимноиндуктивностей фаз магнитоэлектрического генератора (МЭГ);  $R_H, L_H$  – параметры активно-индуктивной нагрузки;  $R_V, L_V$  – параметры вентиля;  $K$  – фундаментальная матрица контуров [1].

С целью обоснования выбора метода численного интегрирования исследуем уравнение (13) на жесткость [3]. Число обусловленности матрицы  $A$  на  $k$ -ом интервале интегрирования определяется по формуле (6):

$$k(A_K) = \|A_K\| \cdot \|A_K^{-1}\|,$$

где



$$\|A_k\| = \|A(i_v^*(t_k), t_k)\| = \left( \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m |a_{jl}|^2 \right)^{1/2} -$$

евклидова норма матрицы  $A_k$ :

$$\|A_k\| = \|A^{-1}(i_v^*(t_k), t_k)\| -$$

евклидова норма матрицы  $A_k^{-1}$ .

Условие жесткости системы определяется на  $k$ -ом интервале коэффициентом жесткости (11):

$$K_{\text{жн}} = \frac{t_{\text{н}}}{\tau_{\text{пс}}},$$

где  $\tau_{\text{пс}} = \|A_k\|^{-1}$  - интервал пограничного слоя [6].

Так как принимается значение  $\tau_{\text{пс}}$  из условия  $\tau_{\text{пс}} = \min_j(\tau_j)$ , а норма матрицы  $A_k$  на

$k$ -ом коммутационном интервале работы ВГ вычисляется « $q$ » раз, то в качестве интервала  $\tau_{\text{пс}}$  при оценке коэффициента жесткости целесообразно выбирать величину, обратную максимальному значению полученной численным путем нормы, т. е.

$$\tau_{\text{пс}} = \frac{1}{\max_k \|A_k\|}.$$

Математическое моделирование показывает, что числа обусловленности матрицы  $A_k$  изменяются в диапазоне 14–40 в любой межкоммутационный интервал и в диапазоне  $2 \cdot 10^4$ – $10^5$  в коммутационные интервалы. При этом  $K_{\text{жн}}$  измеряется в пределах  $8 \cdot 10^2$ – $10^4$ , т.е. система является жесткой.

В качестве метода численного интегрирования жесткой системы уравнений (13) выбран системный метод первого порядка Ю.В. Ракитского [3]. На основе данного метода сформулирован алгоритм автоматического выбора начального шага интегрирования  $H_k = \alpha \|A_k\|^{-1}$ , общего шага  $h_k$  на  $k$ -ом основном интервале интегрирования и алгоритм определения моментов коммутации вентиляей.

Структурная схема алгоритма цифрового моделирования шестифазного МЭГ с однополупериодным выпрямителем и основные блоки моделирующей программы показаны на рис. 2, где обозначены:  $R_{\text{н}}$ ,  $L_{\text{н}}$  – параметры активно-индуктивной нагрузки;  $R_0$  – активное сопротивление фазы генератора;  $K_V$ ,  $K_F$  – количество вентиляей в схеме и число фаз генератора;  $L_{ad}$ ,  $L_{aq}$ ,  $L_s$  – индуктивные параметры

МЭГ;  $E_{\text{фн}}$  – амплитудное номинальное напряжение фазы генератора;  $[SK]$  – фундаментальная матрица контуров;  $\gamma_a = 57,295^\circ$  – константа, определяющая число градусов в одном радиане;  $i_\delta$ ,  $u_\delta$  – базисные ток и напряжение;  $K_Q$ ,  $\alpha$  – настроечные коэффициенты;  $[i_0]$  – вектор начальных значений токов вентиляей; НК – параметр, характеризующий число шагов печати на каждом коммутационном интервале;  $GGK1$ ,  $GGK2$  – задаваемые коммутационный и межкоммутационный шаги печати;  $KG1$ ,  $KG2$ ,  $K$  – соответственно параметры счетчиков коммутационного шага, межкоммутационного шага и общего шага печати;  $T_{10}$  – вспомогательная переменная контроля текущего времени;  $PR = 1$  при выводе результатов расчета на графопостроитель (ГП);  $PR = 0$  при выводе результатов расчета на алфавитно-цифровом печатающем устройстве (АЦПУ);  $NPT$  – число точек, выводимых на графики;  $T_{\text{кон}}$  – конечное время счета;  $IDP$  – шаг дискретности вывода результатов на АЦПУ.

Для уменьшения погрешности вычислений, а также с целью сопоставления характеристик ВГ с различными исходными мощностями и деленными значениями параметров, расчеты на ЭВМ целесообразно проводить после записи уравнений (13) в относительных единицах.

На основе предложенной структурной схемы (см. рис. 2) разработана моделирующая программа решения системы уравнений (13). Время численного интегрирования за два периода изменения ЭДС составляет 36–51 с при исследовании нормальных режимов работы ВГ, до 3 мин. – для аварийных режимов. Настроечные коэффициенты при этом равны  $\alpha = 0,0001$ ,  $K_Q = 1$ .

Шаг численных расчетов в каждый межкоммутационный интервал постоянства режимов при  $\alpha = 0,0001$  автоматически изменяется в диапазоне 2,5–2,6 электрических градусов для нормальных режимов, уменьшаясь до величины порядка 1,8 при аварийных режимах. При исследовании аварийных режимов коэффициент рекомендуется на 3–4 порядка увеличить. Затраты машинного времени при этом значительно сокращаются.

Рассмотрим применение разработанной модели ВГ с однополупериодным выпрямителем при анализе аварийных режимов.

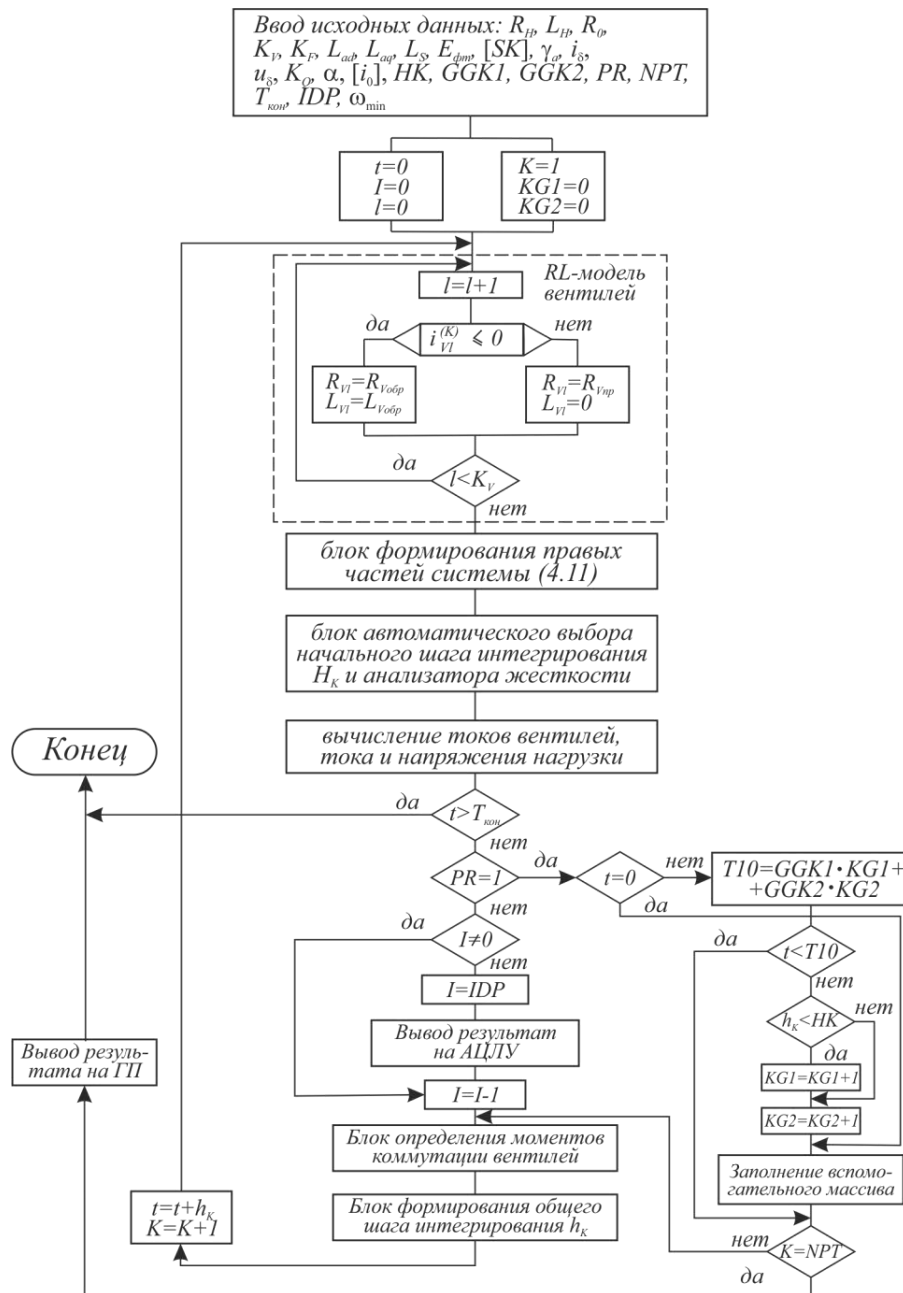


Рис. 2. Алгоритм цифровой модели вентильного магнетоэлектрического генератора

Fig. 2. A digital model algorithm of a valve magneto-electric generator

Внешнее короткое замыкание (КЗ), пробой вентилей и обрывы фаз являются типичными аварийными режимами работы ВГ. С помощью математического моделирования установлено, что любой из этих режимов может стать причиной другой аварии. Так, при высоких нагрузках и обрыве фаз ВГ в схеме возникают большие ударные токи, которые приводят к пробое наиболее нагруженных в данный момент времени вентилей. Пробой вентилей ведет к нарушению кондиционной устойчивости, т. е.

к отсутствию упорядоченного чередования коммутационных и межкоммутационных интервалов постоянства режимов.

Рассмотрим случай внешнего КЗ при малом значении сопротивления нагрузки. На рис. 3 представлены зависимости мгновенных значений токов вентилей и тока нагрузки от угла поворота ротора  $\gamma$ .

Если при исследовании нормальных режимов работы ВГ кривая мгновенных значений тока нагрузки являлась огибающей электро-

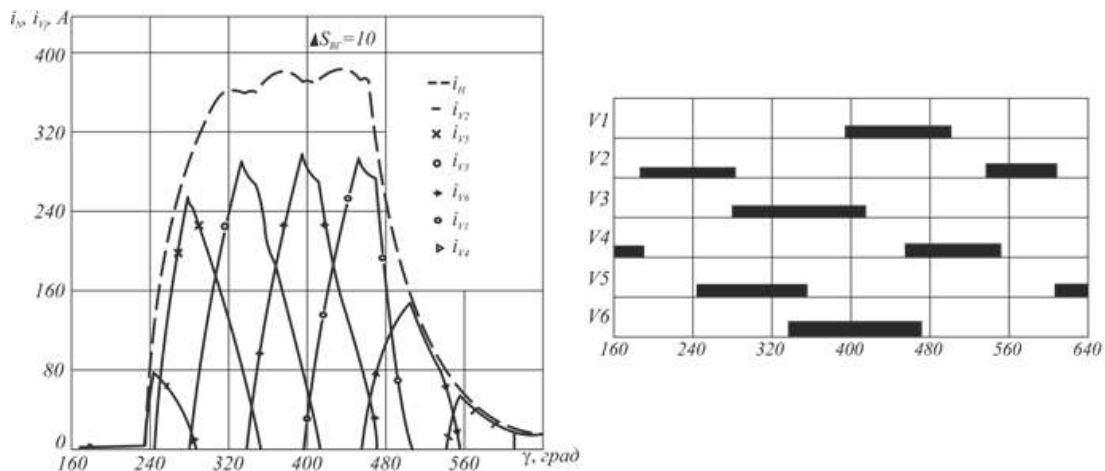


Рис. 3. Токи вентиля, нагрузки и циклограмма работы выпрямителя в режиме, близком к короткому замыканию

Fig. 3. Valve currents, loads and a cyclogram of a rectifier operation in the mode close to a short circuit

магнитных процессов токов вентиля, и амплитудные значения тока нагрузки и токов вентиля практически совпадали, то при анализе режима внешнего КЗ ( $\Delta S_{BG} = R_{ном} / R_n$ ) амплитудные значения данных токов существенно отличаются. При этом помимо роста пульсаций выпрямленного напряжения для  $\Delta S_{BG} = 10$  сильно возрастают пульсации выпрямленного тока. Это происходит из-за того, что индуктивные параметры МЭГ и нагрузки становятся соизмеримыми по величине.

Переходные процессы при обрыве одной ( $a_1$ ) и двух ( $a_1, b_1$ ) фаз ВГ при увеличении и сбросе нагрузки ( $\Delta S_{BG} = 0,5$ ) приведены на рис. 4, 5.

Работа схемы выпрямления ВГ при обрыве фаз  $a_1$  и  $b_1$  также поясняется графиками

тока нагрузки, токов вентиля и циклограммой проводимости вентиля на рис. 6.

Видно, что при включении и отключении нагрузки  $\Delta S_{BG} = 0,5$  в процесс коммутации вступают вентили неповрежденных фаз ВГ. Вентили 1 и 2, соответствующие цепям обрыванных фаз  $a_1$  и  $b_1$ , на формирование выпрямленного тока и напряжения влияния не оказывают. Ток нагрузки, как и в случае анализа нормальных режимов работы ВГ, определяется как огибающая переходных процессов токов вентиля (штриховая линия).

Аналогичные разработки по тематике моделирования объектов подобной природы изучались в трудах [10–17].

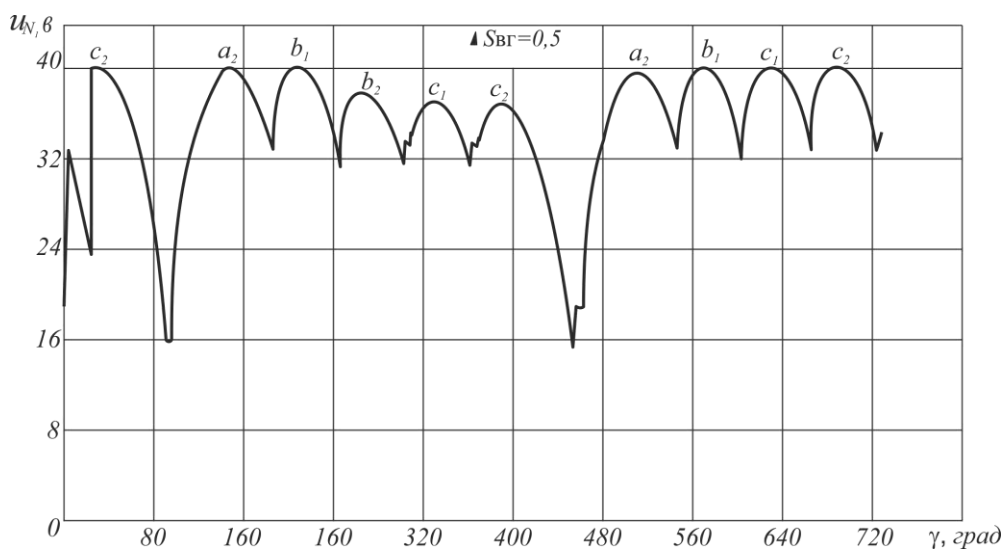
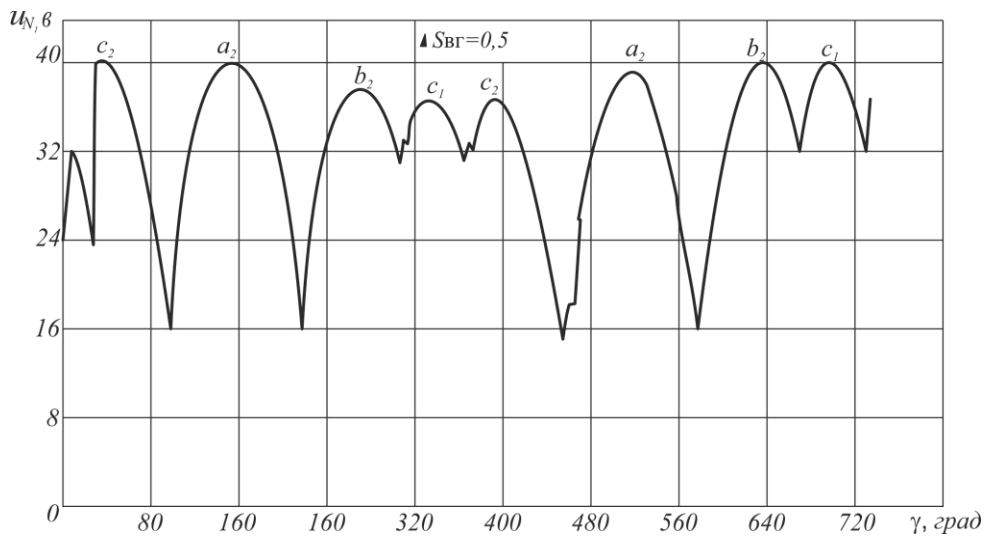
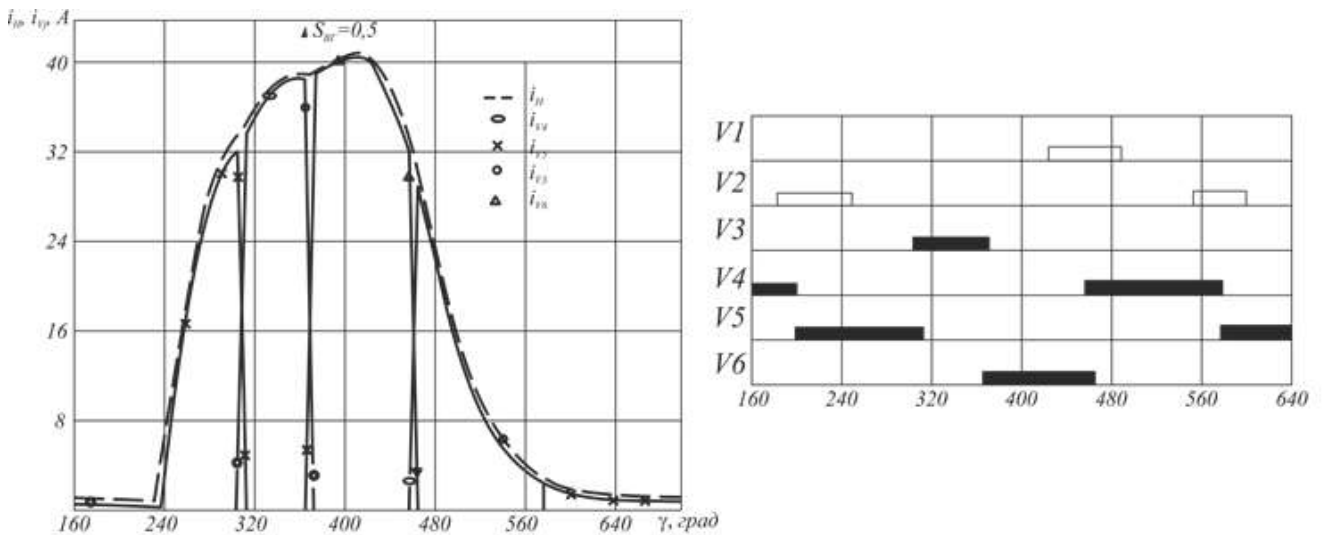


Рис. 4. Напряжение на нагрузке при обрыве фазы  $a_1$  генератора

Fig. 4. Load voltage under the  $a_1$  phase failure of the generator



**Рис. 5** Напряжение на нагрузке при обрыве фаз  $a_1$  и  $b_1$  генератора  
**Fig. 5.** Load voltage under the  $a_1$  and  $b_1$  phases failure of the generator



**Рис. 6.** Токи вентилей, нагрузки и циклограмма работы выпрямителя при обрыве фаз  $a_1$  и  $b_1$  генератора

**Fig. 6.** Valve currents, loads and a cyclogram of a rectifier operation under the  $a_1$  and  $b_1$  phases failure of the generator

### Заключение

Предложенный в работе подход позволяет исследовать уравнения вентильного генератора на жесткость. Формулы (6)–(12) составляют, по существу, математическое описание блока анализатора жесткости моделирующей

программы расчета электромагнитных процессов ВГ [1].

Ряд близких и смежных вопросов моделирования объектов такой физической природы рассмотрен в работах [8–20].

### 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. Конев Ф.Б., Ярлыкова Н.Е. Методы численного решения систем дифференциальных уравнений, применяемые в цифровых моделях вентильных преобразователей. М. : Информэлектрон, 1978. 50 с.
3. Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноуцкий И.Г. Численные методы решения жестких систем. М. : Наука, 1979. 208 с.

4. Демирчян К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. М. : Высш. шк., 1988. 335 с.
5. 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.
6. Лукин В.Н., Романов М.Ф., Толкачев Э.А. Системный анализ электрических цепей и машин. Л. : Изд-во ЛГУ, 1985. 136 с.
7. Беляев П.В. Некоторые свойства математических моделей динамики статических преобразователей энергии // Динамика электрических машин. Омск : ОПИ, 1984. С. 68–74.
8. Дедовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М. : Энергоатомиздат, 1985. 168 с.
9. Некоторые вопросы упрощения математического описания автономной электроэнергетической системы / М.Я. Вайман и др. // Изв. ВУЗов СССР. Сер. Энергетика. 1974. № 11. С. 8–15.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Дижур Д.П. Цифровое моделирование электропередач постоянного тока // Передача энергии постоянным током. М. : Энергоатомиздат, 1985. С. 51–63.
14. Ильин В.Н. Машинное проектирование электронных схем. М. : Энергия, 1972. 274 с.
15. Важнов А.Ш. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л. : Энергия, 1980. 320 с.
16. Якубович В.А., Старжинский В.М. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения. М. : Наука, 1972. 720 с.
17. Лупкин В.М. Аналитическое решение линейных дифференциальных уравнений вентильного двигателя // Электричество. 1981. № 6. С. 22–31.
18. Бреус К.А. О приводимости канонической системы дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами // Докл. АН СССР. 1958. Т. 123. № 1. С. 21–24.
19. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. М. : Высш. шк., 1982. 272 с.
20. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. М. : Энергоатомиздат, 1988. 279 с.

### References

1. Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N. Modelirovanie mnogofaznykh sinkhronnykh mashin v razlichnykh sistemakh koordinat [Modeling of multi-phase synchronous machines in different coordinate systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi Akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2020, vol. 22, no. 4, pp. 104 – 105.
2. Konev F.B., Yarlykova N.E. Metody chislenного resheniya sistem differentsial'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]. Moscow: Informelektro Publ., 1978. 50 p.
3. Rakitskii Yu.V., Ustinov S.M., Chernorutskii I.G. Chislennyye metody resheniya zhestkikh sistem [Numerical methods for solving stiff systems]. Moscow: Nauka Publ., 1979. 208 p.
4. Demirchyan K.S., Butyrin P.A. Modelirovanie i mashinnyi raschet elektricheskikh tsepei [Modeling and machine calculation of electrical circuits]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988. 335 p.
5. 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.
6. Lukin V.N., Romanov M.F., Tolkahev E.A. Sistemy analiz elektricheskikh tsepei i mashin [System analysis of electrical circuits and machines]. Leningrad: LGU Publ., 1985. 136 p.
7. Belyaev P.V. Nekotorye svoystva matematicheskikh modelei dinamiki staticheskikh preobrazovatelei energii [Some properties of mathematical models of the dynamics of static energy converters]. *Dinamika elektricheskikh mashin* [Dynamics of electrical machines]. Omsk: OPI, 1984, pp. 68-74.
8. Dedovskii A.N. Elektricheskie mashiny s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami [Electrical machines with high-coercivity permanent magnets]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1985. 168 p.
9. Vayman M.Ya. i dr. Nekotorye voprosy uproscheniya matematicheskogo opisaniya avtonomnoi 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. Series Energy], 1974, no. 11, pp.8-15.
10. 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. DOI:10.1088/1742-6596/2094/5/052066.
11. Daneev A.V., Sizykh V.N. Algoritmicheskoe obespechenie konstruirovaniya optimal'nykh regulyatorov po neklassicheskim funktsionalam kachestva v vyrozhdennoi formulirovke // *Materiyaly II Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Informatsionnye tekhnologii, ikh prilozheniya i informatsionnoe obrazovanie»* [Proceedings of the II International Scientific Conference «Information technologies, their applications and information education»]. Ulan-Ude, 2021, pp. 74-79.

12. 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.
13. Dizhur D.P. Tsifrovoye modelirovaniye elektropredach postoyannogo toka [Digital modeling of direct current power transmission]. *Peredacha energii postoyannym tokom* [Energy transmission by direct current]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, pp. 51-63.
14. Il'in V.N. Mashinnoye proektirovaniye elektronnykh skhem [Machine design of electronic circuits]. Moscow: Energiya Publ., 1972. 274 p.
15. Vazhnov A.Sh. Perekhodnyye protsessy v mashinakh peremennogo toka [Transient processes in AC machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1980. 320 p.
16. Yakubovich V.A., Starzhinskii V.M. Lineinye differentsial'nye uravneniya s periodicheskimi koeffitsientami i ikh prilozheniya [Linear differential equations with periodic coefficients and their applications]. Moscow: Nauka Publ., 1972. 720 p.
17. Lupkin V.M. Analiticheskoye resheniye lineinykh differentsial'nykh uravnenii ventil'nogo dvigatelya [Analytical solution of linear differential equations of a brushless motor]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1981, no. 6, pp. 22-31.
18. Breus K.A. O privodimosti kanonicheskoy sistemy differentsial'nykh uravnenii s periodicheskimi koeffitsientami [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.
19. Balagurov V.A. Proektirovaniye spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka [Designing special electrical machines for alternating current]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1982. 272 p.
20. Balagurov V.A., Galteev F.F. Elektricheskoye generatory s postoyannymi magnitami [Electric generators with permanent magnets]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1988. 279 p.

### 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, Full Professor, Professor of Department of 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 of 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, Full Professor, Professor of Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: sizykh\_vn@mail.ru.

## Моделирование динамического поведения бруса при повторно-переменных нагрузках в лабораторных условиях

М.А. Дудаев✉, Д.В. Немитовская, А.Э. Верянская

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

✉dudaev\_ma@mail.ru

### Резюме

В статье представлен процесс доработки стенда, позволяющего в лабораторных условиях проводить моделирование динамического нагружения бруса повторно-переменными нагрузками с изменяемой частотой. Частота нагружения установки регулируется, позволяя, таким образом, моделировать динамическое поведение бруса при изгибе на дорезонансном, резонансном и зарезонансном режимах. Для учета влияния распределенной массы балки на частоту собственных колебаний и амплитуду вынужденных колебаний проведено моделирование поведения установки методом конечных элементов; рассчитаны коэффициенты приведения массы балки к точке установки осциллятора. Доработанная конструкция стенда позволяет тарировать установку в режиме статического нагружения непосредственно перед проведением эксперимента, что исключает влияние неподконтрольных параметров. Возбуждение установки осуществляется вращением ротора шагового двигателя, что обеспечивает повышенную точность измерения частоты возбуждения, а также поддерживает ее постоянство. Поведение системы при статическом и динамическом нагружениях отслеживается изменением деформаций в контрольном сечении с применением тензорезисторов и осциллографа, фиксирующего уровень сигнала с тензорезисторов с течением времени. В работе рассмотрены принципиальные схемы драйвера осциллятора и усилителя сигнала с тензорезисторов. Принципиальная электронная схема драйвера шагового двигателя доработана модулем определения частоты вращения двигателя. Установка снабжена демпфирующим элементом, ограничивающим амплитуду колебаний в режимах, близких к резонансу; коэффициент демпфирования определяется в ходе предварительной тарировки по осциллограмме собственных затухающих колебаний. Для подбора эксцентрика, обеспечивающего требуемую величину неуравновешенности, проведен численный расчет методом конечных элементов, выявляющий допустимый диапазон дисбалансов по условию прочности и жесткости установки.

### Ключевые слова

демпфирование, динамика, изгиб, колебания, метод конечных элементов, сопротивление материалов, резонанс, тензометрирование, частотный отклик, электроника

### Для цитирования

Дудаев М.А. Моделирование динамического поведения бруса при повторно-переменных нагрузках в лабораторных условиях / М.А. Дудаев, Д.В. Немитовская, А.Э. Верянская // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2(74). – С. 22–32. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).22-32.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 31.05.2022 г.; поступила после рецензирования: 2.06.2022 г.; принята к публикации: 3.06.2022 г.

## The bar dynamic behavior simulation by repeatable loading at the laboratory conditions

М.А. Dudaev✉, D.V. Nemitovskaya, A.E. Veryanskaya

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉dudaev\_ma@mail.ru

### Abstract

The article deals with revision of the stand for modelling at the laboratory conditions of repeatable loads dynamic loading simulation with various frequencies. Load frequency can be regulated, which allow to simulate of bar bend dynamic behavior at the subcritical, critical and supercritical modes. To take into account the influence of the distributed mass of the beam on the vibration eigenfrequency and the forced vibrations amplitude, the installation behavior was simulated by the finite element method; the beam mass coefficients of reduction to the oscillator installation point were calculated. Construction of stand allows calibrating it at the static load mode before experience that exclude influence uncontrollable parameters. Stand oscillates by rotor of the step motor that provides high accuracy of excitation frequency measurement and maintain it constant. The system behavior at static and dynamic loading is monitored by measuring the deformations at the control section using strain gauges and an oscilloscope that records the signal level from the resistive-strain sensors over time. The article deals with principal schemes of oscillator driver and resistive-strain sensor signal amplifier. The oscillator driver principal scheme has module of motor rotation frequency measurement. The installation is equipped with a damping element that limits the oscillations amplitude at modes close to

resonance; the damping coefficient is determined during preliminary calibration using the oscillogram of natural damped vibrations. To select an eccentric that provides the required value of imbalance, a numerical calculation was made using the finite element method, revealing the permissible range of imbalances in terms of the strength and rigidity of the installation.

### Keywords

damping, dynamics, bending, vibrations, finite element method, resistance of materials, resonance, strain gauging, frequency response, electronics

### For citation

Dudaev M.A., Nemitovskaya D.V., Veryanskaya A.E. Modelirovanie dinamicheskogo povedeniya brusa pri povtornopremennykh nagruzkakh v laboratornykh usloviyakh [The bar dynamic behavior simulation by repeatable loading at the laboratory conditions]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2(74), pp. 22–32. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).22-32.

### Article info

Received: May 31, 2022; revised: June 2, 2022; accepted: June 3, 2022.

### Введение

Разделы механики твердого деформируемого тела, такие как сопротивление материалов [1, 2], теория колебаний [3, 4], теория упругости [5, 6] были и остаются на сегодняшний день фундаментом при подготовке инженеров-механиков, конструкторов, технологов, строителей. При изучении таких дисциплин важное значение имеют лабораторные работы, которые позволяют моделировать физические процессы, протекающие при деформировании материалов, а также оценивать точность теоретических и эмпирических подходов к решению практических задач.

В рамках исследования рассматривается разработка лабораторной установки, предназначенной для моделирования и анализа динамического поведения балки при вынужденных колебаниях, вызванных массивным осциллятором [4].

Лабораторный стенд с контролируемыми по амплитуде и частоте возмущающей силы возбуждения параметрами позволяет определять:

- частоты собственных колебаний;
- амплитуды напряжений, деформаций и перемещений при заданной частоте возмущения, отличной от частоты собственных колебаний;
- параметры демпфирования колебаний, ограничивающих их амплитуду вблизи зоны резонанса.

Указанные проблемы динамики позволяют сформулировать следующие технические требования к проектируемой лабораторной установке:

1. Установка должна содержать упругий элемент (балку) возможно меньшей массы, которая располагается на жестком и массивном

основании и массивном осцилляторе (двигатель с эксцентриком).

2. Жесткость установки должна изменяться для получения различных частот собственных колебаний.

3. Частота работы осциллятора должна изменяться для получения различных частот вынужденных колебаний так, чтобы перекрывать весь диапазон частот собственных колебаний.

4. Комплекс измерительных устройств должен предоставлять возможность регистрации частоты работы осциллятора и параметров динамического поведения с течением времени.

5. При недостаточном естественном демпфировании колебаний установка должна быть снабжена амортизирующим устройством.

Исходя из требований, предъявляемых к лабораторной установке, можно заключить, что комплекс работ по ее разработке и реализации подразумевает проектирование и изготовление механических устройств (крепления осциллятора, эксцентрика, демпфера), электрических схем и устройств, управляющих работой осциллятора и обеспечивающих регистрацию параметров эксперимента, а также проведение инженерного анализа, позволяющего осуществлять прогнозирование динамического поведения установки в реальных условиях.

Кроме перечисленных особенностей в статье рассмотрены калибровка установки и проведение пробного динамического эксперимента.

### Доработка базового стенда

За основу для разработки принят стенд для определения перемещений при статическом приложении сосредоточенной силы [7]. Конструктивно базовый стенд представляет собой



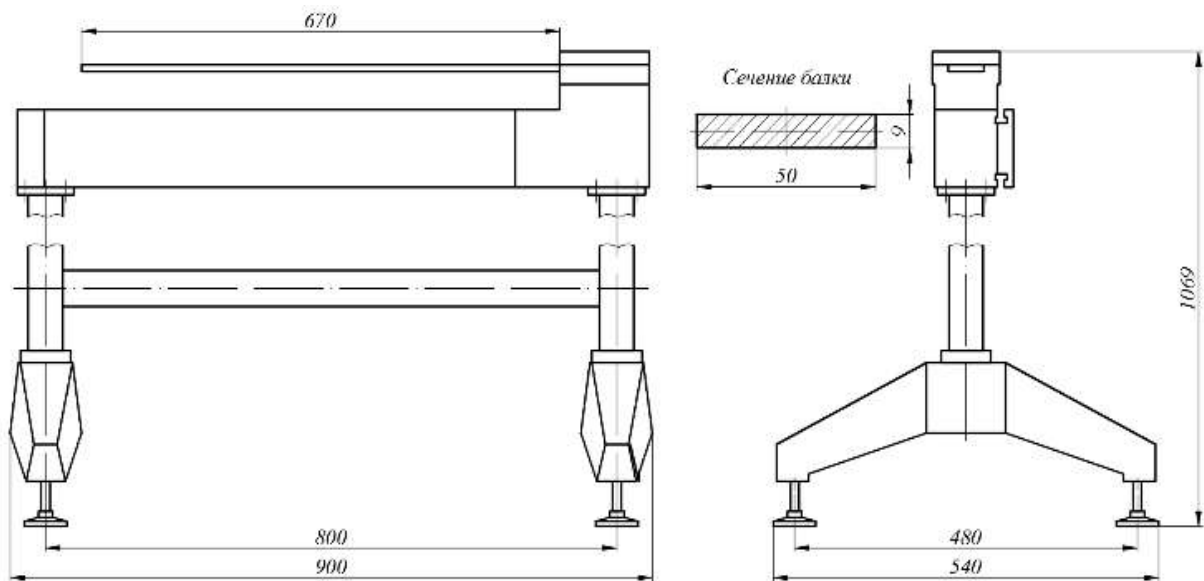


Рис. 1. Исходная установка

Fig. 1. Base installation

стальную балку, консольно закрепленную на массивное литое основание, установленное на опоры (рис. 1).

Для доработки стенда на него устанавливается осциллятор, представляющий из себя шаговый двигатель ШД-5Д1МУ3, узел крепления (рис. 2), эксцентрик и демпфер. Выбор в пользу шагового двигателя сделан ввиду строго соответствия частоты управляющих импульсов и частоты вращения, что упрощает конструкцию тахометра, позволяющего контролировать эту частоту. Узел крепления представляет собой направляющую, способную перемещаться вдоль балки, соединенную сваркой со стальной плитой, к которой изогнутыми шпильками прикрепляется двигатель. Для фиксации узла крепления в нужном положении в нижней части направляющей предусмотрено резьбовое отверстие, в которое ввинчивается изогнутая шпилька. Каждый эксцентрик представляет собой кронштейн с радиально установленным болтом и контровочной гайкой (его расчет и рисунок приводится в предпоследнем разделе).

В лабораторных условиях были проведены измерения параметров рабочих частей установки: размеры балки ( $L \times b \times h$ ):  $670 \times 50 \times 9$  мм; масса балки  $m_6 = 2,38$  кг; материал – сталь 45, модуль Юнга  $E = 210$  ГПа; масса осциллятора в сборе  $m_0 = 3,18$  кг.

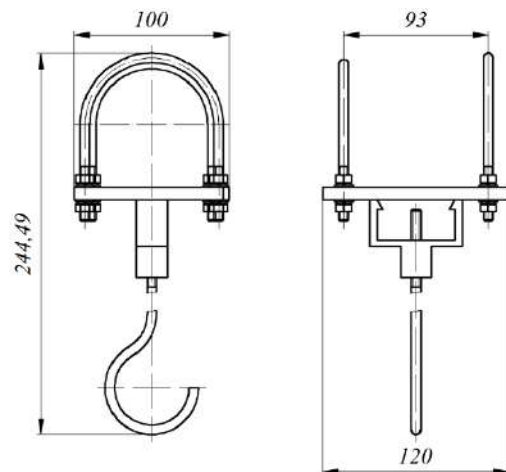


Рис. 2. Кронштейн осциллятора

Fig. 2. Oscillator bracket

Поскольку сосредоточенная масса осциллятора соизмерима с распределенной массой балки, система содержит бесконечное число степеней свободы [4]. Решение уравнения динамики для этого случая оказывается достаточно сложным и зачастую в курсе сопротивления материалов не рассматривается. При использовании зависимостей для систем с одной степенью свободы предлагается вместо массы осциллятора использовать условную приведенную массу:

$$m_{\text{пр}} = m_0 + k_{\text{пр}} \cdot m_6 \quad (1)$$

где  $k_{пр}$  – коэффициент приведения массы балки к точке установки осциллятора.

При этом под приведенной принимается такая масса условного груза, образующего систему с одной степенью свободы, аналогичную заданной по жесткости, при которой частота и форма колебаний близка к частоте и форме колебаний реальной системы. Для системы с известной круговой частотой собственных колебаний  $p$  приведенная масса, определяемая из выражения [4]:

$$p = \sqrt{\frac{k}{m_{пр}}}, \quad (2)$$

где  $k$  – жесткость балки, Н/м.

Из справочника по сопротивлению материалов [8] жесткость консольной балки:

$$k = \frac{3EJ_x}{l^3};$$

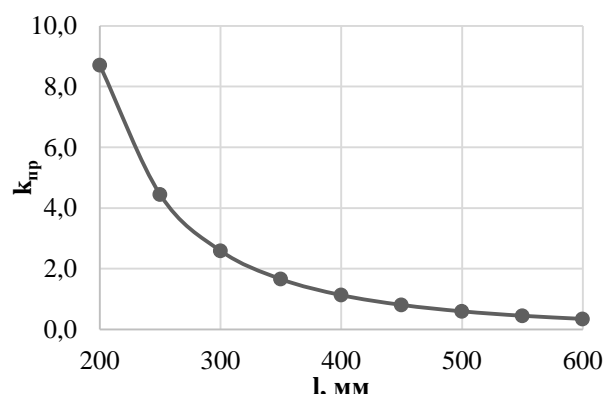
где  $J_x$  – осевой момент инерции сечения. При указанной на рис. 1 форме и размерах сечения  $J_x = 3037,5 \text{ мм}^4$ .

Для определения собственных частот колебаний реальной установки используется моделирование методом конечных элементов (МКЭ) [9, 10], в ходе которого получен диапазон реальных собственных частот колебаний системы при разных положениях осциллятора, а на основании выражений (1) и (2) соответственно вычислена приведенная масса груза и коэффициент приведения массы балки. Моделирование балки выполнено с применением специального элемента Тимошенко [11], учитывающего дополнительную податливость сдвига. Результаты расчета приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Расчетные характеристики системы  
**Table 1.** Estimated system characteristics

$l$ , мм	$f$ , Гц	$p$ , $\text{с}^{-1}$	$m_{пр}$ , $10^{-3}$ т	$k$ , Н/мм	$k_{пр}$
200	15,93	100,06	23,89	239,2	8,703
250	15,03	94,39	13,74	122,5	4,439
300	13,87	87,12	9,34	70,9	2,588
350	12,61	79,18	7,12	44,6	1,655
400	11,37	71,39	5,87	29,9	1,129
450	10,22	64,19	5,10	21,0	0,805
500	9,19	57,73	4,59	15,3	0,594
550	8,29	52,04	4,25	11,5	0,448

На рис. 3 показан график зависимости коэффициента приведения массы балки в зависимости от положения осциллятора.



**Рис. 3.** График зависимости коэффициента приведения массы балки в зависимости от положения осциллятора

**Fig. 3.** Beam mass reduction coefficient diagram vs oscillator position

Результаты расчета МКЭ позволяют установить потребный диапазон рабочих частот вращения вала двигателя  $n_{дв}$  так, чтобы перекрыть диапазон собственных частот колебаний системы, на основании соотношения:

$$n_{дв} = \frac{30p}{\pi}.$$

При диапазоне собственных круговых частот колебаний балки  $47,06 - 100,06 \text{ с}^{-1}$  частота вращения вала двигателя должна лежать в пределах  $450 - 956 \text{ об./мин}$ .

### Драйвер шагового двигателя

Разработана принципиальная схема драйвера по управлению шаговым двигателем (рис. 4) [12].

В основу схемы положен генератор импульсов [13] DD1 на микросхеме-таймере NE555. Частота генерируемых импульсов регулируется переменным резистором R1. Для ограничения максимальной частоты генератора последовательно с резистором R1 устанавливается постоянный резистор R2. Сигнал с генератора поступает на счетчики-делители DD2 и DD3, выполненные на микросхемах – двоично-десятичных счетчиках CD4017. Счетчик DD2 делит частоту импульсов генератора на шесть для управления шестифазным шаговым двигателем. Счетчик DD3 делит частоту импульсов генератора на четыре для возможности контроля частоты вращения двигателя частотомером так,

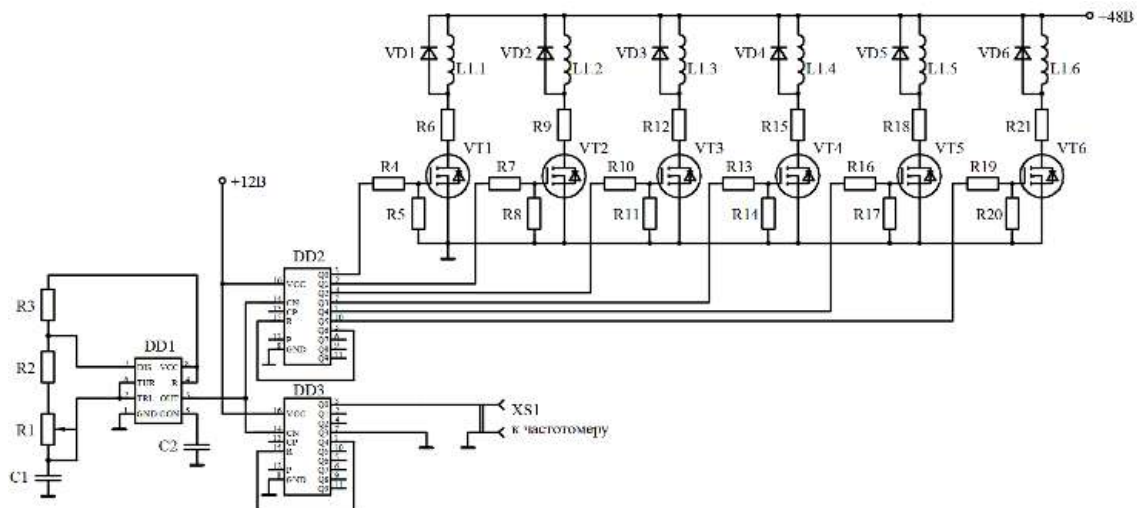


Рис. 4. Принципиальная схема драйвера шагового двигателя  
Fig. 4. Step motor driver principal scheme

чтобы показания частотомера в Гц соответствовали частоте вращения двигателя в оборотах в минуту. К выходам Q0 – Q5 генератора подключается блок коммутации, выполненный на MOSFET-транзисторах IRF3205. Для ограничения тока управляющего заряда в цепь затвора каждого транзистора включен резистор сопротивлением 100 Ом, а для обнуления потенциала на затворе в режиме отсутствия сигнала он соединен с общим проводом через резистор сопротивлением 10 кОм. Для ограничения тока в цепи стока последовательно с обмоткой двигателя включен резистор сопротивлением 5,1 Ом. Диоды VD1...VD6 в обратном включении шунтируют обмотки двигателя и предназначены для защиты транзисторов от противоЭДС обмоток. Управляющая часть питается напряжением 12 В, коммутирующая часть – напряжением +48 В, что соответствует номинальному напряжению двигателя ШД-5Д1МУ3.

Номиналы деталей задающей цепи генератора рассчитаны следующим образом. В соответствии с паспортом двигателя ШД-5Д1МУ3 его угловой шаг составляет 1,5°. Тогда для совершения одного полного оборота в 360° требуется сгенерировать 240 импульсов. Для работы двигателя в диапазоне частоты 8,29 – 15,93 Гц (см. табл. 1) частота генерации импульсов должна составлять:  $f_{\min} = 240 \cdot 8,29 = 1989,6$  Гц;  $f_{\max} = 240 \cdot 15,93 = 3823,2$  Гц.

Частота генерации сигналов таймера NE555 определяется по формуле [9]:

$$f_{NE555} = \frac{1}{\ln 2 \cdot (R1 + R2 + R3) \cdot C1}$$

На основании указанной зависимости подобраны следующие номиналы деталей: R1 = 60 кОм, R2 = 5,1 кОм, R3 = 4,3 кОм, C1 = 22 нФ. Реальный диапазон частот генерации сигналов при двух крайних положениях движка переменного резистора R1 составляет  $f_{\min} = 889,8$  Гц;  $f_{\max} = 4786,6$  Гц, что с запасом перекрывает требуемый диапазон.

Для соответствия численных показаний частотомера частоте вращения вала двигателя в оборотах в минуту сигнал генератора делится на четыре, поскольку 1 об./с требует генерации 240 импульсов в секунду, а 1 об./мин. – четыре импульса в секунду.

Мощность токоограничивающих резисторов номиналом 5,1 Ом в цепях стоков рассчитана на основании максимального паспортного тока, потребляемого двигателем ( $I_{\max} = 3$  А). Суммарная мощность, рассеиваемая резисторами:

$$P_{\Sigma} = I_{\max}^2 R = 3^2 \cdot 5,1 = 45,9 \text{ Вт.}$$

Поскольку резисторы установлены отдельно для каждой из шести фаз двигателя, мощность одного резистора

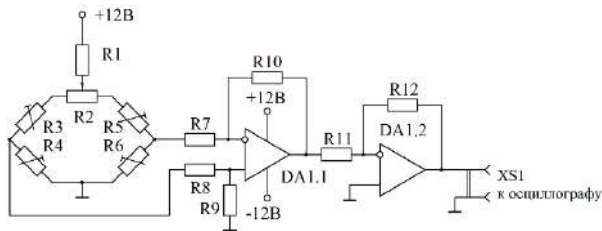
$$P_R = \frac{P_{\Sigma}}{6} = \frac{45,9}{6} = 7,65 \text{ Вт.}$$

Окончательно для установки применены токоограничивающие резисторы мощностью 10 Вт, коммутирующие транзисторы установлены на радиаторы, а в корпус блока управле-

ния двигателем встроен вентилятор для принудительной циркуляции охлаждающего воздуха.

### Тензометр

Для регистрации динамического поведения установки она снабжается тензометрическим устройством, представляющим собой тензомост с балансиром и тензоусилителем [13]. Принципиальная схема тензометра показана на рис. 5.



**Рис. 5.** Принципиальная схема тензоусилителя  
**Fig. 5.** Strain gauging amplifier principal scheme

Тензомост состоит из четырех тензорезисторов R3 – R6 КФ5П1 с номинальным сопротивлением 200 Ом, включенных в полный мост Уитстона. При наклейке тензорезисторов на балку резисторы R3 и R6 размещаются на верхней ее поверхности, а R4 и R5 – на нижней. Для балансировки тензомоста используется переменный резистор R2 сопротивлением 33 Ом, а для ограничения тока устанавливается резистор R1. Номинальный паспортный ток питания тензорезистора КФ5П1 составляет 20 мА. Тогда суммарный ток, протекающий через обе ветви тензомоста составляет 40 мА. При напряжении питания 12 В потребное сопротивление тензомоста составляет 300 Ом. Сопротивление одних только тензорезисторов, включенных в мост Уитстона составляет 200 Ом (резистор R2 не учитывается). Тогда потребное сопротивление резистора R1 составляет 100 Ом. При разбалансировке тензомоста вследствие деформации балки сигнал с диагонали поступает через резисторы R7 и R8 на входы операционного усилителя DA1.1 (TL072), включенного по дифференциальной схеме. Соотношения сопротивлений резисторов R9:R8 и R10:R7, определяющие коэффициент усиления каскада, выбраны равными 10. Сигнал с выхода DA1.1 через резистор R11 поступает на инвертирующий вход операционного усилителя DA1.2, включенного по схеме инвертирующего усилителя. Соотношения сопротивлений резисторов R12:R11, определяющие

коэффициент усиления каскада, выбраны равными 10. Общий коэффициент усиления тензоусилителя составляет 100. К выходу усилителя DA1.2 подключается осциллограф, посредством которого регистрируется полезный сигнал. Питание тензоусилителя – двухполярное, напряжением  $\pm 12$  В.

### Подбор эксцентрика

Для расчета параметров эксцентрика проведен анализ частотного отклика установки МКЭ [14] при единичном статическом дисбалансе эксцентрика ( $D_s = m_e e = 1$  г·мм). Частота возмущающей силы  $f_F$  изменялась линейно от нуля до 20 Гц, а амплитуда  $F_A$  – пропорционально квадрату угловой скорости [15]:

$$F_A = m_e e \cdot 4\pi f_F^2 = 4\pi f_F^2.$$

Для задания параметров демпфирования при расчете МКЭ с установки были сняты осциллограммы свободных затухающих колебаний. В качестве демпфера на установке используется поролоновая прокладка, проложенная между станиной и балкой вблизи ее свободного конца. При этом поролон приклеен только к станине, а с балкой лишь вступает в контакт, чтобы в систему не привносилась существенная дополнительная упругая связь.

На рис. 6 показана осциллограмма затухающих колебаний, полученная при расположении осциллятора на отметке 500 мм. Встроенными средствами приложения-осциллографа были измерены амплитуды двух колебаний  $A_i$  и  $A_{i+j}$  [16], отделенных друг от друга  $j$  циклами. Результаты измерений составили:  $A_i = 683$  мВ;  $A_{i+j} = 156$  мВ;  $j = 13$ . Тогда логарифмический декремент затухающих колебаний [4]:

$$\delta = \frac{1}{j} \ln \left( \frac{A_i}{A_{i+j}} \right) = \frac{1}{13} \ln \left( \frac{683}{156} \right) = 0,1136.$$

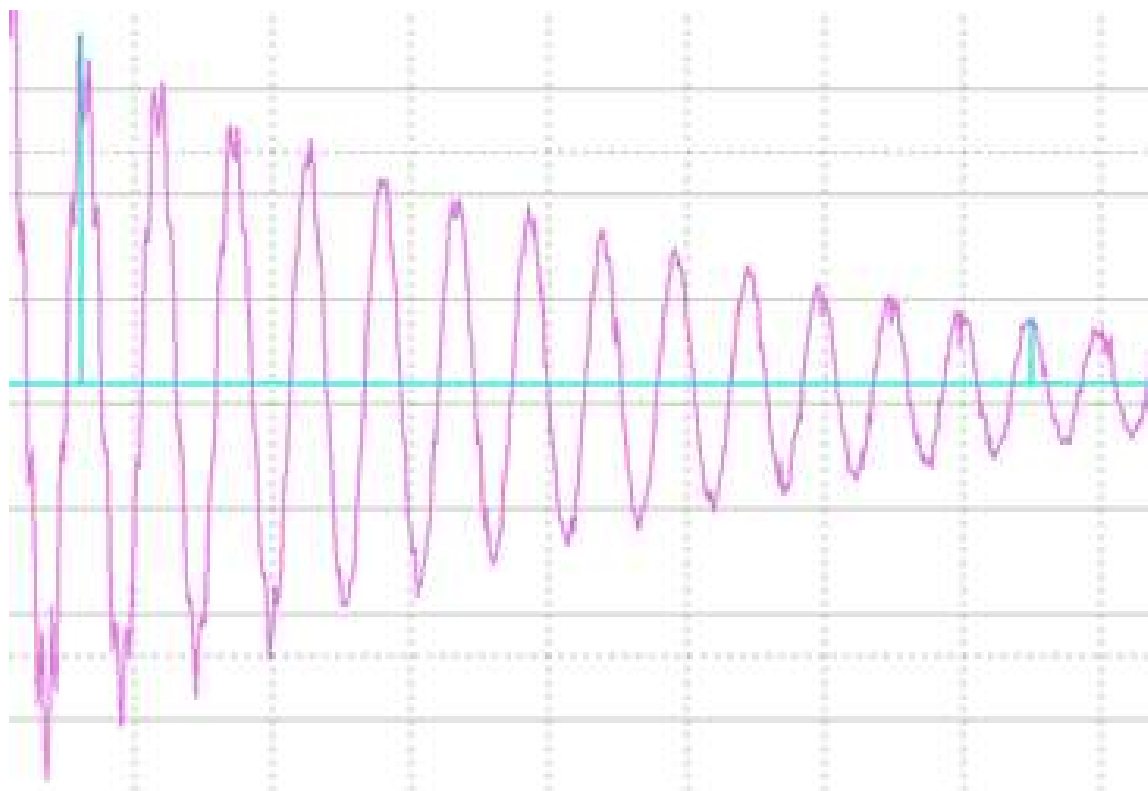
Относительный коэффициент демпфирования [4]:

$$\gamma = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0,1136}{2 \cdot 3,14} = 0,0181.$$

т. е., составляет 1,81 % от критического коэффициента демпфирования.

Аналогичные расчеты проведены для остальных расположений осциллятора на установке.

Результаты обработки экспериментальных данных представлены в табл. 2.



**Рис. 6.** Осциллограмма затухающих колебаний  
(установки осциллографа: X – 200мс/дел; Y – 200 мВ/дел)

**Fig. 6.** Decay vibrations oscillogram  
(oscilloscope settings: X – 200 ms/div; Y – 200 mV/div)

**Таблица 2.** Коэффициенты демпфирования  
**Table 2.** Damping coefficients

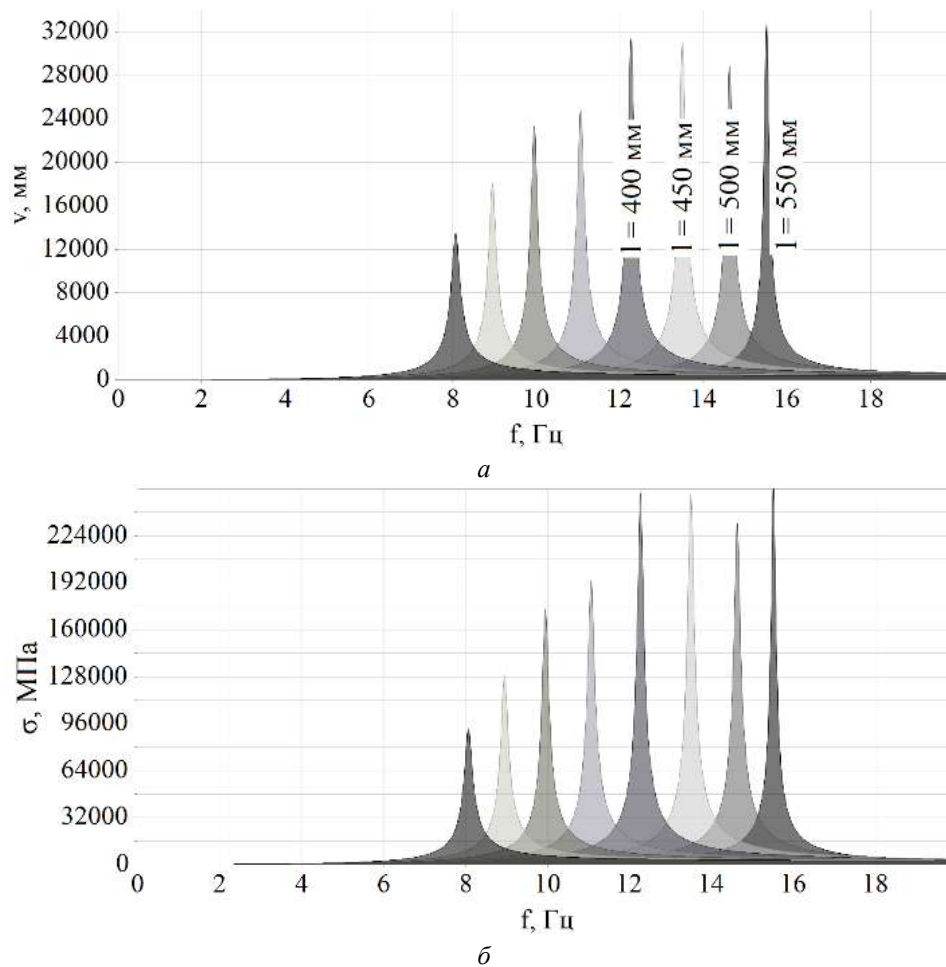
$l$ , мм	$A_i$ , мВ	$A_{i+j}$ , мВ	$j$	$\delta$	$\gamma$
550	744,14	132,81	12	0,1436	0,0229
500	683	156	13	0,1136	0,0181
450	305,67	111,73	11	0,0915	0,0146
400	630,3	183,4	14	0,0882	0,0140
350	497,5	177,08	15	0,0689	0,0110
300	440,58	164,43	15	0,0657	0,0105
250	470,09	225,56	12	0,0612	0,00974
200	276,15	139,13	17	0,0403	0,00642

С учетом реальных значений относительных коэффициентов демпфирования проведен расчет частотного отклика МКЭ. Амплитудно-частотные диаграммы, построенные по результатам расчета показаны на рис. 7 [17]. Из анализа диаграмм видно, что при единичном статическом дисбалансе максимальный теоретический прогиб свободного конца балки составляет 33 000 мм, а максимальное напряжение у заделки – 256 000 МПа. По конструктивным соображениям максимальный допускаемый прогиб принят

равным  $[v] = 15$  мм, а максимальное допускаемое напряжение (при пределе выносливости стали 45, равном 245 МПа и запасе прочности 2,0)  $[\sigma] = 120$  МПа.

При указанных допускаемых значениях реальный статический дисбаланс по условию жесткости требуется уменьшить в 2 200 раз, по выносливости – в 2 130 раз. Для выполнения обоих условий принимается меньшая величина статического дисбаланса:

$$D_s = \frac{1}{2200} = 4,545 \cdot 10^{-3} \text{ т}\cdot\text{мм}$$



**Рис. 7.** Амплитудно-частотные характеристики при различных положениях осциллятора: *a* – амплитудные значения максимального прогиба в зависимости от частоты осциллятора; *б* – амплитудные значения максимальных напряжений в зависимости от частоты осциллятора

**Fig. 7.** Amplitude-frequency characteristics at the different oscillator position  
*a* – amplitude of maximal flexure vs. oscillation frequency; *b* – amplitude of maximal stresses vs. oscillation frequency

Эксцентрики устанавливаются симметрично с двух сторон на вал двигателя. Корпус изготовлен на 3D принтере из пластика PLA [18]. Масса одного эксцентрика в сборе – 31,3 гр (рис. 8).

Фиксация эксцентрика на валу осуществляется затягиванием винта М3. Регулирование положения центра масс (и величины дисбаланса) осуществляется ввинчиванием болта М6. Диапазон положений центров масс от оси вала двигателя составляет 20–26,5 мм, что при указанной массе и при наличии двух эксцентриков обеспечивает диапазон дисбалансов  $(1,252–1,659) \cdot 10^{-3}$  т·мм. Пробный запуск показал достаточность указанного диапазона, обеспечивающего надежное и безопасное возбуждение

упругой системы во всем диапазоне возможных положений осциллятора.

### Натурный эксперимент

Для проведения эксперимента осциллятор был установлен на расстоянии 500 мм от заделки. Положение центра масс эксцентрика выбрано максимальным  $r_{\text{экс}} = 26,5$  мм. При этом собственная частота колебаний установки в соответствии с табл. 1 составляет 9,19 Гц ( $p = 57,73 \text{ с}^{-1}$ ), а коэффициент демпфирования (см. табл. 2)  $\gamma = 0,0181$ .

Непосредственно перед проведением динамического эксперимента производится тарирование установки под действием статической нагрузки, необходимое для установления соответствия между величиной напряжения уси-

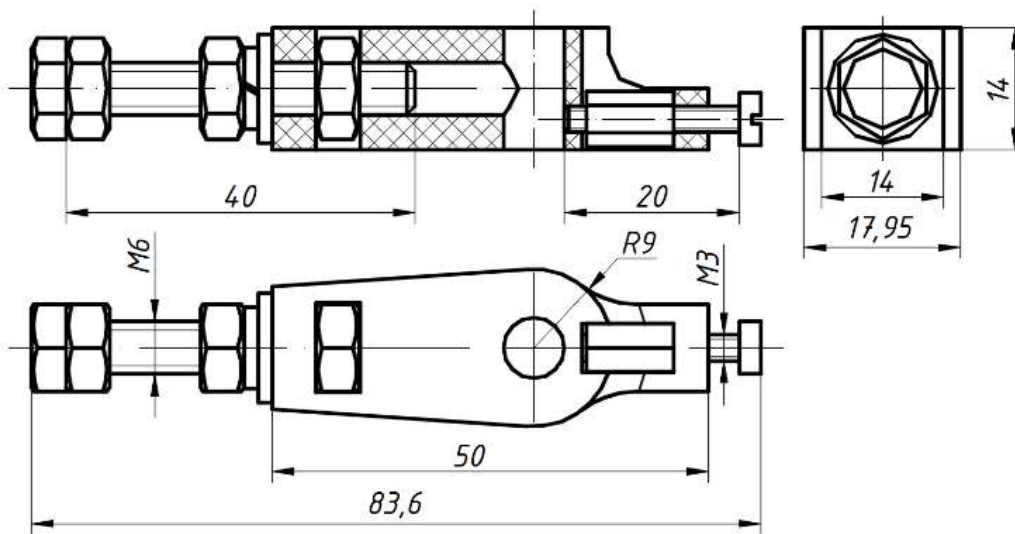


Рис. 8. Эксцентрик  
Fig. 8. Eccentric

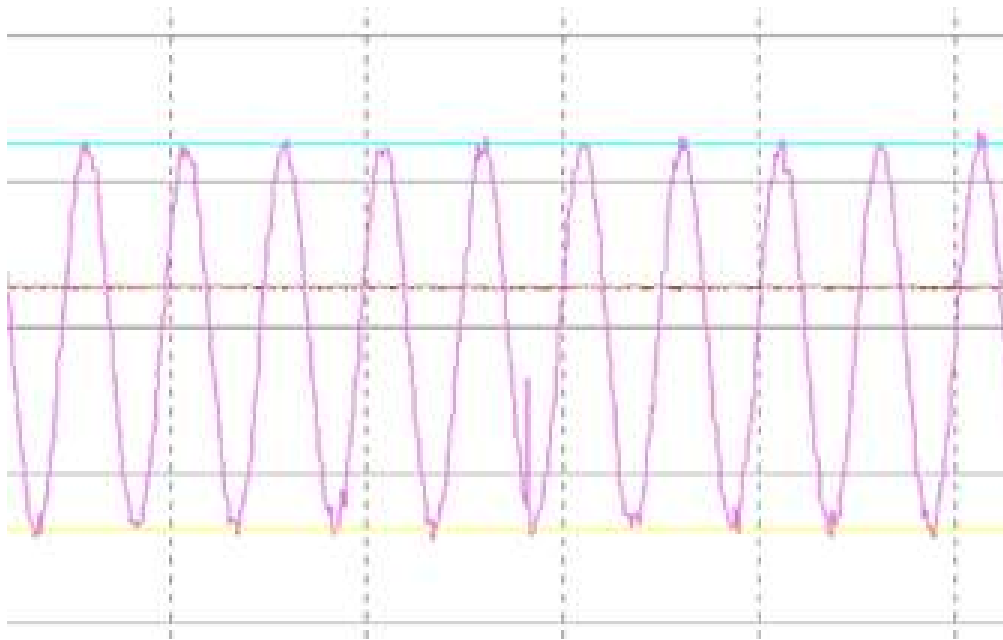


Рис. 9. Осциллограмма вынужденных колебаний  
(Установки осциллографа: X – 200мс/дел; Y – 200 мВ/дел)  
Fig. 9. Forced vibrations oscillogram  
(Oscilloscope sets: X – 200ms/Div; Y – 200 mV/Div)

ленного сигнала с тензорезисторов, измеряемого осциллографом, и величиной, приложенной к установке нагрузки. Для тарирования лабораторного стенда в точку установки осциллятора статически прикладываются грузы массой 5 кг (вес 49 Н), а осциллографом измеряется величина изменения напряжения. Результаты измерений приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты эксперимента

Table 3. Experience results

Масса груза $m_{гр}$ , кг	Вес груза $G$ , Н	Показания осциллографа $U$ , мВ
0	0	0
5	49	380
10	98	728
15	137	1096

Таким образом, при среднем приращении нагрузки  $\Delta G = 49$  Н среднее приращение показаний осциллографа по напряжению составляет  $\Delta U = 365,3$  мВ. Тарировочный коэффициент тензометрического узла равен

$$k_g = \frac{\Delta G}{\Delta U} = \frac{49}{365,3} = 0,1341 \frac{\text{Н}}{\text{мВ}}.$$

При проведении эксперимента осциллятор был выведен на частоту возмущения  $\omega = 62 \text{ с}^{-1}$ . В этом случае величина теоретического динамического коэффициента [1]:

$$K_{dt} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)^2 + \left(\frac{2\gamma\omega}{p}\right)^2}} = 6,32.$$

Осциллограмма сигнала тензометра показана на рис. 9.

Амплитуда сигнала осциллографа составляет  $U_A = 262,5$  мВ. Тогда динамическое усилие с учетом тарировочного коэффициента  $-F_d = U_A \cdot k_g = 262,5 \cdot 0,1341 = 35,2$  Н.

Величина центробежной силы, создаваемой эксцентриком при указанной угловой скорости, массе и положении центра масс составляет:

$$F_c = m_{\text{экс}} \cdot \omega^2 \cdot r_{\text{экс}} = 2 \cdot 31,3 \cdot 10^3 \cdot 62^2 \cdot 26,5 = 6,38 \text{ Н}$$

Экспериментальный динамический коэффициент

$$F_c = \frac{F_d}{F_c} = \frac{35,2}{5,411} = 6,51.$$

Погрешность теоретического и экспериментального коэффициента

$$\Delta = \left| \frac{K_{dt} - K_{db}}{K_{dt}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{6,38 - 6,51}{6,38} \right| \cdot 100\% = 2,04\%.$$

что допустимо в технических расчетах.

## Заключение

При использовании подхода приведения распределенной массы балки к точке установки осциллятора и математической модели динамического поведения системы с одной степенью свободы была получена достаточная степень точности расчетных и экспериментальных результатов.

Возможности разработанного в лаборатории стенда не ограничиваются исследованием динамического поведения систем с одной степенью свободы при вынужденных колебаниях, а позволяют исследовать и разрабатывать новые математические модели, в том числе систем с бесконечным числом степеней свободы и комбинированных систем. Кроме того, дальнейшая доработка установки электромагнитным демпфером с управляемыми характеристиками, позволит расширить исследование проблем динамики, касающихся, в частности, влияния разных механизмов и степени демпфирования на ее поведение.

## Список литературы

1. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 2000. 560 с.
2. Сопротивление материалов / Г.С. Писаренко, В.А. Агарев, А.Л. Квитка [и др.]. Киев: Вища шк, 1986. 775 с.
3. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Дрофа, 2004. 591 с.
4. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
5. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высш. шк., 1990. 400 с.
6. Тимошенко С.П., Гудьер Дж.Н. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.
7. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 592 с.
8. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.
9. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542 с.
10. Chen Z. Finite Element Methods and Their Applications. Berlin: Springer, 2005. 411 p.
11. Дудаев М.А. Матрица жесткости балки Тимошенко в конечноэлементном анализе динамического поведения роторных турбомашин // Вестник ИрГТУ. 2014. № 6. С. 59–65.
12. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины учеб. для вузов по напр. подготовки диплом. спец. «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»: в 2-х т. Т. 2. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МЭИ, 2004. 532 с.
13. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гурув А.И. Аналоговая и цифровая электроника. Полный курс. М.: Горячая линия-Телеком, 2000. 768 с.
14. Bathe K.J. Finite Element Procedures. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice hall, 1996. 1037 p.
15. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики: в 2-х т. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1983. Т. 2. Динамика. 640 с.
16. Электрические измерения / Л.И. Байда, Н.С. Добротворский, Е.М. Душин [и др.]. Л.: Энергия. Ленингр. отд. 1980. 392 с.
17. Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечноэлементное моделирование конструкций. Киев: Киевский политехнический институт, 2011. 317 с.



18. Шумейко И.А., Зайченко Н.О. Анализ пластмасс при их выборе для 3d печати модели ветроэнергетической установки // *Universum: технические науки*. 2021. №3-1 (84). С. 74 – 77.

### References

1. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2000. 560 p.
2. Pisarenko G.S., Agarev V.A., Kvitka A.L., Popkov V.G., Umanskiy E.S. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Kiev: Vysshaya. Shkola Publ., 1986. 775 p.
3. Babakov I. M. *Teoriya kolebaniy* [Theory of vibrations]. Moscow: Drofa Publ., 2004. 591 p.
4. Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Vibration problems in engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.
5. Aleksandrov A.V., Potapov V.D. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti* [Fundamentals of the Theory of Elasticity and Plasticity]. Moscow: Vysshaya. Shkola Publ., 1990. 400 p.
6. Timoshenko S. P., Goodier J.N. *Teoriya uprugosti* [Theory of Elasticity]. Moscow: Nauka Publ., 1975. 576 p.
7. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana Publ., 1999. 592 p.
8. Pisarenko G.S. Jakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook of resistance of materials]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1988. 736 p.
9. Zienkiewicz O.C. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The finite element method in engineering science]. Moscow: Mir Publ., 1975. 539 p.
10. Chen Z. *Finite Element Methods and Their Applications*. Berlin: Springer, 2005. 411 p.
11. Dudaev M.A. *Matritsa zhestkosti balki Timoshenko v konechnoelementnom analize dinamicheskogo povedeniya rotnykh turbomashin* [Timoshenko Beam Stiffness Matrix in Finite Element Analysis of Turbomachine Dynamic Behavior]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of the Irkutsk National Research Technical University], 2014, no. 6, pp. 59–65.
12. Ivanov-Smolenskiy A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electric Machines] Moscow: MEI Publ., 2004. 532 p.
13. Opadchii Yu.F. Gludkin O.P., Gurov A.I. *Analogovaya i tsifrovaya elektronika* [Analog and Digital Electronics]. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2000. 768 p.
14. Bathe K.J. *Finite Element Procedures*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice hall, 1996. 1038 p.
15. Loitsyanskiy L.G., Lur'e A.I. *Kurs teoreticheskoy mehaniki (v 2-kh tomakh)*. T. 2. [Theoretical mechanics course (in 2 vol.)]. Vol. 2]. Moscow: Nauka Publ, 1983. 640 p.
16. Baida L.I., Dobrotvorskiy N.S., Dushin E.M. Ismailov Sh.Yu., Mokienko D.N., Preobrazhenskii A.A., Starosel'tseva E.A., Fremke L.V., Tsvetkov E.I. *Elektricheskie izmereniya* [Electrical Measurements]. Leningrad: Energiya Publ., 1980. 392 p.
17. Rudakov K.N. *FEMAP 10.2.0. Geometricheskoe i konechnoelementnoe modelirovanie konstruksii* [FEMAP 10.2.0. Geometric and finite element modeling of structures]. Kiev: Kievskii Politekhnikeskii Institut Publ., 2011. 317 p.
18. Shumeiko I.A., Zaichenko N.O. *Analiz plastmass pri ikh vybore dlya 3d pechati modeli vetroenergeticheskoy ustanovki* [Analysis of Plastics when Choosing Them for 3d Printing of a Wind Power Plant Model]. *Universum: tehnikeskie nauki* [Universum: technical sciences], 2021, no. 3-1(84), pp. 74-77.

### Информация об авторах

*Дудаев Михаил Алексеевич*, старший преподаватель кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [dudaev\\_ma@mail.ru](mailto:dudaev_ma@mail.ru).

*Немитовская Дарья Владимировна*, кафедра строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [DVNemito@yandex.ru](mailto:DVNemito@yandex.ru).

*Верянская Алина Эдуардовна*, кафедра строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [vralina2002@gmail.com](mailto:vralina2002@gmail.com).

### Information about the authors

*Mikhail A. Dudaev*, Assistant Professor of the Department of Physics, mechanics and instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [dudaev\\_ma@mail.ru](mailto:dudaev_ma@mail.ru).

*Dar'ya V. Nemitovskaya*, Department of Building of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [DVNemito@yandex.ru](mailto:DVNemito@yandex.ru).

*Alina E. Veryanskaya*, Department of Building of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [vralina2002@gmail.com](mailto:vralina2002@gmail.com).

## Введение во фракционный анализ сингулярных («жестких») систем дифференциальных уравнений, представляющих материальные объекты железнодорожного транспорта

В.А. Нехаев<sup>1</sup>✉, В.А. Николаев<sup>1</sup>, Е.Г. Леоненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск, Российская Федерация

✉nehaevva@rambler.ru

### Резюме

Довольно часто в науке, да и в транспортной механике тоже, мы сталкиваемся с явлением, когда аргумент некоторой функции чрезвычайно мал, а ее значение при этом весьма велико, но их произведение все же ограничено по величине. Такие математические модели или системы дифференциальных уравнений называют «жесткими». Их численное интегрирование требует применения специальных методов, например, метода Гира, иначе потребуются затратить очень много «машинного» времени. Хотя и в этом случае правильный результат не гарантирован. Академик Российской академии наук А.Н. Тихонов доказал теорему о разделении движения динамической системы на «быстрые» и «медленные» составляющие, которая при корректном ее применении обеспечивает заданную точность решения, а ее основу составляют всего пять условий. По образному и меткому выражению профессора Московского государственного университета И.В. Новожилова, исследователь сначала как бы смотрит в телескоп и видит изменение «медленных» переменных, а затем – в микроскоп и, очевидно, видит «быстрые» составляющие. К сожалению, теоретический материал, посвященный данной теореме, в основном публикуется математиками в соответствующих журналах на определенном уровне. Инженеры, выпускаемые техническими вузами, не обладают математическими знаниями в том объеме, который необходим для понимания тихоновской теоремы, хотя с задачами, требующими ее применения, в жизни встречаются довольно часто. Большие усилия к внедрению этой теоремы в приложения были затрачены профессором И.В. Новожиловым, опубликовавшим несколько монографий по этому вопросу. В настоящей статье делается попытка с инженерной, методической точки зрения рассмотреть решение известной, и, конечно же, решенной задачи Стокса. Получено точное и приближенные решения и проведено их сравнение.

### Ключевые слова

система дифференциальных уравнений, сингулярно и регулярно возмущенная математическая модель, спектр-системы, асимптотический метод, фракционный анализ, предельная асимптотическая модель, «быстрые» и «медленные» составляющие, размерные и безразмерные переменные

### Для цитирования

Нехаев В.А. Введение во фракционный анализ сингулярных («жестких») систем дифференциальных уравнений, представляющих материальные объекты железнодорожного транспорта // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2(74). – С. 33–46. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).33-46.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 19.04.2022 г.; поступила после рецензирования: 6.06.2022 г.; принята к публикации 7.06.2022 г.

## Introduction to fractional analysis of singular («rigid») systems of differential equations representing material objects of railway transport

V.A. Nekhaev<sup>1</sup>✉, V.A. Nikolaev<sup>1</sup>, E.G. Leonenko<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Krasnoyarsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉nehaevva@rambler.ru

### Abstract

Quite often in science, as well as in transport mechanics, one faces a phenomenon in which the argument of some function is extremely small, while its value is very large, but their product is still limited in size. Such mathematical models or systems of differential equations are called «rigid». Their numerical integration requires the use of special methods, like a Gear method; otherwise, it may take too much «machine» time. Although in this case the correct result is not guaranteed either. Academician of the Russian Academy of Sciences A.N. Tikhonov proved a theorem on separating the motion of a dynamic system into «fast» and «slow» components, which, if applied correctly, guarantees a given accuracy of the solution, its basis being made up of only 5 conditions. According to the figurative and apt expression of the professor of Moscow State University I.V. Novozhilov, it's as

if the researcher first looks through a telescope seeing a change in «slow» variables and then, looking through a microscope, obviously sees «fast» components. Unfortunately, the theoretical material devoted to this theorem is mainly published by mathematicians in the corresponding journals at the appropriate level. Engineers graduating from technical universities do not have the necessary body of mathematical knowledge to understand the Tikhonov's theorem, although in life they often face problems requiring its application. Great efforts to introduce this theorem into applications were spent by Professor of Moscow State University I.V. Novozhilov, who published several monographs on this issue. In this article, an attempt is made from an engineering, methodological point of view to consider the solution of the well-known, and, of course, solved, Stokes problem. Exact and approximate solutions are obtained and compared.

### Keywords

system of differential equations, singularly and regularly perturbed mathematical model, spectrum systems, asymptotic method, fractional analysis, limiting asymptotic model, «fast» and «slow» components, dimensional and dimensionless variables

### For citation

Nekhaev V.A., Nikolaev V.A., Leonenko E.G. Vvedenie vo fraktsionnyi analiz singulyarnykh («zhestkikh») sistem differentsial'nykh uravnenii, predstavlyayushchikh material'nye ob"ekty zheleznodorozhnogo transporta [Introduction to fractional analysis of singular or «rigid» systems of differential equations representing material objects of railway transport]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2(74), pp. 33–46. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).33-46.

### Article info

Received: April 19, 2022; received: June 6, 2022; accepted: June 7, 2022.

### Введение

В реальной жизни часто приходится иметь дело с такими системами дифференциальных уравнений, которые считаются «жесткими». Другими словами, когда в составе сил, действующих на систему, имеется такая сила, что даже при малых аргументах она обладает очень большими значениями, но ее произведение на аргумент, все же, является некоторой ограниченной величиной. Встречаются и задачи, спектр составляющих которых сильно разнесен, когда численное интегрирование требует чрезвычайно малого шага интегрирования и, как следствие, большого количества машинного времени. Иногда требуется разработка некоей предельной асимптотической математической модели сложного физического объекта, например, гироскопа.

Физическим примером таких систем является проблема взаимодействия колеса подвижного состава и железнодорожного пути. Численное интегрирование таких дифференциальных уравнений требует специальных методов решения, например, способ Гира либо их предварительную математическую обработку. К последней относится так называемый фракционный анализ [1]. Он как бы позволяет смотреть на процесс эволюции системы, описываемой системой сингулярных дифференциальных уравнений, сначала в микроскоп. Тогда мы можем обнаружить малые и быстрые флуктуации решения, но не увидим в целом перспективы развития решения. А если обратиться к теле-

скопу, то малых и быстрых флуктуаций мы не увидим, но точно определим медленные изменения поведения системы на большом промежутке времени.

Развивается теория сингулярно возмущенных систем, в основном, математиками, их работы разбросаны по периодической литературе и обычно начинаются фразой «рассмотрим систему дифференциальных уравнений, содержащую малые параметры где-то либо слева при производных, либо справа при правых частях». В действительности в наших исследованиях мы не обнаруживаем таких готовых уравнений, поэтому часто инженерами вводится малый параметр искусственно, чтобы воспользоваться готовым рецептом или решением, полагая затем его равным единице [2–8]. При таком подходе возникает вопрос о сходимости получаемых рядов, например, при  $\mu = 1$  они могут оказаться расходящимися.

### Пример решения

Далее рассматривается достаточно простой пример (так называемая задача Стокса), решаемый с помощью известной теоремы академика А.Н. Тихонова о разделении движений динамической системы на «быстрые» и «медленные» составляющие. Эта теорема содержит пять условий, при выполнении которых гарантировано получение решения и его точность.

Рассмотрим сингулярно возмущенную систему общего вида:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = Y(y, z, t, \mu); y(0) = y_0 \\ \mu \frac{dz}{dt} = Z(y, z, t, \mu); \mu \ll 1. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $y$  и  $z$  соответственно  $n$ - и  $m$ -мерные векторы. Положив  $\mu = 0$  и, естественно, опустив  $z_0$ , получим из (1) вырожденную систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = Y(y, z, t, \mu); y(0) = y_0 \\ 0 = Z(y, z, t, \mu); \mu \ll 1. \end{cases} \quad (2)$$

Нужно ответить на вопрос о близости решений систем (1) и (2), который решается с помощью теоремы академика А.Н. Тихонова.

Примем следующие допущения:

1. Функции  $Y = (y, t, z, \mu)$  и  $Z = (y, z, t, \mu)$  аналитичны по  $y, z, t, \mu$  в некоторой области пространства переменных.

2. Уравнение  $Z = (y, z, t, 0) = 0$  имеет корень  $z = \varphi(y, t)$  в некоторой ограниченной области  $D$  изменения переменных  $y, t$ , и этот корень – изолированный.

3. Функция  $Y = (y, \varphi(y, t), 0)$  аналитична по  $y, t$ .

4. Начальные условия  $z_0$  лежат в области влияния корня  $z = \varphi(y, t)$  системы  $\frac{dz}{dt} Z(y, z, t, 0)$ .

5. Точка покоя  $z = \varphi(y, t)$  системы  $\frac{dz}{dt} Z(y, z, t, 0)$  является асимптотически устойчивой по Ляпунову для всех  $y, t$ , для которых определен корень уравнения  $Z(y, z, t, 0) = 0$ . Тогда найдется такое  $\mu_0 > 0$ , что при  $0 \leq \mu \leq \mu_0$  решение системы (1) существует, единственно и удовлетворяет предельным равенствам:

$$\begin{cases} \lim_{\mu \rightarrow 0} y(t, \mu) = \bar{y}(t) \text{ при } 0 \leq t \leq t_0; \\ \lim_{\mu \rightarrow 0} z(t, \mu) = \bar{z}(t) \text{ при } 0 \leq t \leq t_0, \end{cases}$$

где  $0 \leq t \leq t_0$  – ограниченный, лежащий внутри области  $D$  интервал времени, на котором существует единственное решение системы (1). В область  $0 \leq t \leq t_0$  для  $z$  не входит нулевая точка. Это исключает пограничный слой бесконечно малой протяженности, где разность  $\|z - \bar{z}\|$  велика.

Обсуждение условий теоремы можно обнаружить в [5, 6, 9–12]. Отмечается, что для нелинейных систем принципиально важным

является последнее, пятое условие. Если условия теоремы дополнить замечанием профессора Московского государственного университета И.В. Новожилова, что теорему Тихонова можно использовать для исследования неавтономных динамических систем, у которых «быстрые» собственные составляющие движения имеют затухающий характер, а воздействия на систему, зависящие явно от времени, – медленные функции.

Рассмотрим физический пример движения шарика в вязкой жидкости (задача Стокса). Шарик падает в вязкую жидкость, которая, в свою очередь, оказывает сопротивление его движению, равное  $R = kV$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности, определяемый, вообще говоря, вводимыми идеализациями. Материальная точка – это идеализация некоторого твердого тела, когда его размеры не существенны для решения задачи. Если взять твердое тело, то оно может вращаться вокруг своего центра масс, а так как жидкость вязкая, то некоторая ее часть, несомненно, будет вовлечена во вращение, тогда при определенных условиях за шариком могут образоваться отрывающиеся от него вихри, следовательно, задача существенным образом усложнится, но наша цель заключается не в том, чтобы точнее описать движение шарика, а в том, чтобы проиллюстрировать методику применения фракционного анализа, поэтому простейшая уже принятая нами идеализация считается корректной и справедливой). При решении задачи примем следующие обозначения:  $V$  – скорость движения,  $m$  – масса шарика,  $h$  – высота сосуда с жидкостью. Необходимо найти решение при тривиальных начальных условиях.

Уравнения движения шарика описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dT} = V; \\ m \frac{dV}{dT} = mg - kV, \end{cases} \quad (3)$$

где заглавными буквами обозначены размерные физические величины (переменные задачи):  $X$  – вертикальное перемещение шарика,  $T$  – время,  $V$  – скорость движения шарика (а маленькими буквами в дальнейшем будем обозначать безразмерные величины).

**Точные решения**

Нами специально была выбрана задача, имеющая точные решения, с которыми можно сравнивать приближенное решение, получаемое с помощью фракционного анализа. Интегрирование системы (3) начнем со второго уравнения, которое с помощью метода разделения переменных сначала приведем к виду:

$$\frac{dV}{mg - kV} = \frac{dT}{m};$$

или

$$\int_0^V \frac{dV}{mg - kV} = \frac{1}{m} \int_0^T dT \quad (4)$$

В (4) все интегралы являются табличными и поэтому легко вычисляются, в результате получим:

$$V = \frac{mg}{k} (1 - e^{-\frac{k}{m}T}). \quad (5)$$

Отсюда находим (подставляя (5) в первое дифференциальное уравнение системы (3)):

$$\frac{dX}{dT} = \frac{mg}{k} (1 - e^{-\frac{k}{m}T}).$$

Вновь разделяем переменные:

$$\int_0^X dX = \frac{mg}{k} \int_0^T (1 - e^{-\frac{k}{m}T}) dT.$$

Вычисляем интегралы и получаем закон для перемещения шарика:

$$X = \frac{mg}{k} \left[ T - \frac{m}{k} (1 - e^{-\frac{k}{m}T}) \right];$$

или

$$X = \frac{mg}{k} T - \frac{m}{k} V.$$

Таким образом, точные решения системы дифференциальных уравнений таковы:

$$\begin{cases} V = \frac{mg}{k} (1 - e^{-\frac{k}{m}T}); \\ X = \frac{mg}{k} T - \frac{m}{k} V. \end{cases} \quad (6)$$

Определим размерности наших переменных:

$$k = \left[ \frac{\kappa \Gamma c}{m} \right]; \quad m = \left[ \frac{\kappa \Gamma c \cdot c^2}{m} \right]; \quad g = \left[ \frac{M}{c^2} \right]; \quad \frac{m}{k} = [c];$$

$$\frac{mg}{k} = \left[ \frac{M}{c} \right].$$

Изучая окончательные размерности, трудно установить, что отношение массы шарика к коэффициенту пропорциональности для

сопротивления движению измеряется в секундах, это есть постоянная времени системы, которую обозначим через  $T_2$ . Если предположить, что шарик падает достаточно долго и поэтому устанавливается некоторая предельная скорость падения, то имеем:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dT} = 0; \\ mg - kV_\infty = 0, \end{cases}$$

тогда:

$$\begin{cases} T_2 = \frac{m}{k}; \\ V_\infty = \frac{mg}{k} = gT_2, \end{cases}$$

Следовательно, уравнения (6) теперь можно записать в виде:

$$\begin{cases} V = V_\infty (1 - e^{-\frac{k}{m}T}); \\ X = V_\infty T - VT_2. \end{cases} \quad (7)$$

Пусть при  $T = T_1$   $X = h$ , т.е. имеем:

$$\begin{cases} h = V_\infty T_1 - VT_2; \quad h = V_\infty T_1 - V_\infty \left( 1 - e^{-\frac{T_1}{T_2}} \right) T_2; \\ \frac{h}{V_\infty T_2} = \frac{T_1}{T_2} - 1 + e^{-\frac{T_1}{T_2}}; \quad \frac{h}{V_\infty T_2} + 1 - e^{-\frac{T_1}{T_2}} = \frac{T_1}{T_2}. \end{cases} \quad (8)$$

Последнее уравнение в системе (8) является нелинейным относительно постоянной времени  $T_1$  и поэтому оно может быть разрешено либо графическим способом, либо приближенным способом, например, разложением экспоненты в ряд Тейлора, при ограничении тремя членами ряда, если высота сосуда небольшая:

$$\frac{h}{V_\infty T_2} - \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^2 = 0;$$

или

$$T_1 \cong T_2 \sqrt{\frac{2h}{V_\infty T_2}} = \sqrt{\frac{2h}{g}}. \quad (9)$$

Если же предположить, что шарик падает в безвоздушном пространстве, то его движение является равноускоренным и, следовательно, запишем:

$$\begin{cases} h = \frac{1}{2} g T_1^2; \\ T_1 = \sqrt{\frac{2h}{g}}. \end{cases} \quad (10)$$

Сравнение формулы (9), полученной разложением экспоненты в ряд с сохранением трех

членов, и второго выражения системы (10) указывает на их полную идентичность. Отсюда следует вывод, что постоянную времени системы  $T_1$  можно оценивать, используя простейшую расчетную схему. Это характерно для асимптотических и приближенных методов.

### Приближенные решения

Следуя алгоритму фракционного анализа, проведем нормализацию уравнений движения шарика (3):

$$t = \frac{T}{T_*}; x = \frac{X}{X_*}; v = \frac{V}{V_*}, \quad (11)$$

здесь  $T_*$ ,  $X_*$ ,  $V_*$  – некоторые характерные величины, от выбора которых априори зависит класс исследуемого движения. Подставляя вместо  $T$ ,  $X$ ,  $V$  их значения, определяемые соотношениями (11), получим:

$$\begin{cases} \frac{X_*}{V_* T_*} \frac{dx}{dt} = v; \\ \frac{V_*}{g T_*} \frac{dv}{dt} = 1 - \frac{k V_*}{mg} v. \end{cases} \quad (12)$$

Для оценки характерных постоянных времени системы используем, как нам рекомендует фракционный анализ, простейшие грубые математические модели (ибо задача состоит в оценке не самих величин переменных, а их порядков). Пусть среда не оказывает сопротивления падению шарика, тогда второе уравнение системы (3) может быть переписано так:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dT} = g; V = gT; \\ T = \frac{V_*}{g}. \end{cases}$$

Теперь предположим, что на шарик действует только сила сопротивления, т.е. второе дифференциальное уравнение системы (4) будет иметь вид:

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dT} = -kV; \int \frac{dV}{V} = -\frac{k}{m} \int dT; \\ \ln \left| \frac{V}{C_1} \right| = -\frac{k}{m} T; V = C_1 e^{-\frac{k}{m} T} = C_1 e^{-\frac{T}{T_2}}; \\ T_2 = \frac{m}{k}. \end{cases} \quad (13)$$

Последнее выражение в системе (13) и есть еще одна искомая постоянная времени системы. Введем также другую постоянную времени системы, равную:

$$T_3 = \frac{X_*}{V_*}.$$

Следовательно, система дифференциальных уравнений (12) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{T_3}{T_*} \frac{dx}{dt} = v; \\ \frac{T_*}{T_*} \frac{dv}{dt} = 1 - \frac{T_1}{T_2} v. \end{cases} \quad (14)$$

Теперь все зависит от выбора двух конкретных величин  $T_*$  и  $V_*$ , именно их выбор и будет выделять для рассмотрения соответствующие классы движений системы.

1. Случай движения в «малом».

Обратимся к случаю малого трения, когда процесс изменения скорости шарика определяется силой тяжести.  $T_1 = \frac{X_*}{g}$  – характерное

время изменения скорости шарика за счет силы тяжести;  $T_2 = \frac{m}{k}$  – характерное время изменения скорости шарика за счет силы трения;

$T_3 = \frac{X_*}{V_*} = \frac{h}{V_*}$  – характерное время падения шарика на дно сосуда. «Быстрые» движения происходят во временном масштабе  $T_1$ , поэтому выберем  $T_* = T_1$ , тогда:

«Быстрые» движения происходят во временном масштабе  $T_1$ , поэтому выберем  $T_* = T_1$ , тогда:

$$\begin{cases} \frac{T_3}{T_1} \frac{dx}{dt} = v; \\ \frac{dv}{dt} = 1 - \mu v, \end{cases} \quad (15)$$

здесь  $\mu = \frac{T_1}{T_2} \ll 1$  – малый параметр, безраз-

мерная величина;  $\lambda = \frac{T_1}{T_2} \gg 1$  – большой пара-

метр, безразмерная величина. Разделим первое уравнение системы (15) на большой параметр, получим:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \mu_1 v; \\ \frac{dv}{dt} = 1 - \mu_2 v, \end{cases} \quad (16)$$

где  $\mu_1 = \frac{T_1}{T_3}$ ,  $\mu_2 = \frac{T_1}{T_2}$  – два малых параметра, значительно меньше 1. Первый малый параметр можно привести к виду:

$$\mu_1 = \frac{T_1 T_2}{T_2 T_3} = \mu \varepsilon,$$

здесь  $\varepsilon = T_1/T_3$  – новый малый параметр. Подставляя (15) в (16), находим для исследования на временном интервале  $T_1$  систему дифференциальных уравнений с малыми параметрами при правых частях:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \varepsilon \mu v; \\ \frac{dv}{dt} = 1 - \mu v. \end{cases} \quad (17)$$

решение которой можно искать методом Пуанкаре, т.е. с помощью рядов по малому параметру, например, для  $v$ :

$$\begin{cases} v = v^{(0)} + \mu v^{(1)} + \mu^2 v^{(2)} + \mu^3 v^{(3)} + \dots; \\ \frac{dv}{dt} = \frac{dv^{(0)}}{dt} + \mu \frac{dv^{(1)}}{dt} + \mu^2 \frac{dv^{(2)}}{dt} + \mu^3 \frac{dv^{(3)}}{dt} + \dots, \end{cases} \quad (18)$$

следовательно, получаем:

$$\begin{cases} \frac{dv^{(0)}}{dt} = 0; v^{(0)}(0) = v_0; \\ \frac{dv^{(1)}}{dt} = -v^{(0)}; v^{(1)}(0) = 0; \\ \frac{dv^{(2)}}{dt} = -v^{(1)}; v^{(2)}(0) = 0; \\ \dots \end{cases} \quad (19)$$

Интегрируя последовательно систему дифференциальных уравнений (19), находим решения:

$$\begin{cases} \frac{dv^{(0)}}{dt} = 1; v^{(0)} = v_0 + t; \\ \frac{dv^{(1)}}{dt} = -v^{(0)} - t; v^{(1)} = -v_0 t - \frac{1}{2} t^2; \\ \frac{dv^{(2)}}{dt} = v_0 t + \frac{1}{2} t^2; v^{(2)} = \frac{1}{2} v_0 t^2 + \frac{1}{6} t^3; \\ \dots \end{cases}$$

общий член ряда (18) будет таким:

$$v^{(k)} = (-1)^k \left[ v_0 \frac{t^k}{k!} + \frac{t^{k+1}}{(k+1)!} \right],$$

в результате решение второго уравнения системы (17) можно записать так:

$$v = v_0 \left( 1 - \mu t + \frac{\mu^2 t^2}{2!} - \dots \right) + \left( t - \frac{\mu t^2}{2!} + \frac{\mu^2 t^3}{3!} - \dots \right). \quad (20)$$

Если вспомнить, что разложение показательной функции в ряд Тейлора имеет вид:

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + (-1)^n \frac{x^n}{n!},$$

то нетрудно показать, что ряд (20) сходится к следующей функции:

$$v = v_0 e^{-\mu t} + \frac{1}{\mu} (1 - e^{-\mu t}), \quad (21)$$

которая является решением второго дифференциального уравнения системы (17). Нужно здесь отметить, что получение асимптотическим методом некоторой конечной функции – это скорее исключение (ибо далеко не всегда удается построить весь ряд (18)), чем правило.

Если же в (21) вернуться к размерным единицам, приняв  $v_0 = 0$ , что следует из начальных условий задачи, то:

$$\begin{cases} v = \frac{T_2}{T_1} \left( 1 - e^{-\frac{T_1}{T_2}} \right); \\ \frac{V}{V_*} = \frac{mg}{kV_*} \left( 1 - e^{-\frac{T}{T_2}} \right); V = V_\infty \left( 1 - e^{-\frac{T}{T_2}} \right). \end{cases} \quad (22)$$

Сравнивая последнее выражение системы (22) с первой формулой (7), констатируем их полное совпадение.

Запишем формулы для трех приближений в размерных единицах, чтобы нанести их на график:

$$\begin{cases} \frac{V^{(0)}}{V_\infty} = \frac{T}{T_1}; \\ \frac{V^{(1)}}{V_\infty} = \frac{T}{T_2} - \frac{1}{2} \left( \frac{T}{T_2} \right)^2; \\ \frac{V^{(2)}}{V_\infty} = \frac{T}{T_2} - \frac{1}{2} \left( \frac{T}{T_2} \right)^2 + \frac{1}{6} \left( \frac{T}{T_2} \right)^3; \\ \frac{V^{(3)}}{V} = \frac{T}{T_2} - \frac{1}{2} \left( \frac{T}{T_2} \right)^2 + \frac{1}{6} \left( \frac{T}{T_2} \right)^3 - \frac{1}{24} \left( \frac{T}{T_2} \right)^4. \end{cases}$$

На рис. 1 приведены графики точного и приближенного решений исходной задачи (задача Стокса). Чем больше членов ряда мы принимаем в расчет, тем точнее на больших интервалах времени представляется решение. Приближенные решения достаточно близки к точному лишь на интервале времени  $\mu t \ll 1$ , т.е. при  $T \ll T_2$ . Для большого времени  $T \gg T_2$  и расхождение между точным и приближенным

решениями становится большой величиной. Этот факт является естественным для асимптотических методов решения дифференциальных уравнений. Расчеты были выполнены для следующих исходных данных:  $g = 9,805 \text{ м/с}^2$ ;  $m = 2 \text{ кгс}\cdot\text{с}^2/\text{м}$ ;  $k = 0,2 \text{ кгс}\cdot\text{с}/\text{м}$ ;  $h = 20 \text{ м}$ . Постоянные времени задачи равны:  $T_1 = 2,02 \text{ с}$ ;  $T_2 = 10 \text{ с}$ ;  $T_3 = 0,204 \text{ с}$ ,  $V_\infty = 98,05 \text{ м/с}$ .

2. Случай движения в «большом». Рассмотрим класс движения в «большом», когда характерная скорость  $V_*$  равна установившейся скорости падения:

$$\begin{cases} mg - kV_* = 0; \\ V_* = V_\infty = \frac{mg}{k}, \end{cases}$$

а характерное время  $T_* = T_3$ , тогда вместо (14) получим:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v; \mu \frac{dv}{dt} = 1 - v; \\ \mu = \frac{T_1}{T_3} \ll 1. \end{cases} \quad (23)$$

Покажем, что в случае  $T_1/T_2 = 1$ :

$$T_1 = \frac{V_*}{g} = \frac{mg}{kg} = \frac{m}{k} = T_2.$$

«Вырожденная» система для (23) имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v; x(0) = x_0; \\ 0 = 1 - v; v(0) = v_0, \end{cases}$$

отсюда, в частности, следует:

$$\begin{cases} v^0 = 1; \\ \frac{dx}{dt} = v^0; \\ x = x_0 + v^{(0)}t. \end{cases} \quad (24)$$

Чтобы доказать справедливость вырождения, будем действовать согласно алгоритму теоремы академика А.Н. Тихонова и рассмотрим «присоединенную» систему:

$$\frac{dv}{d\tau} = 1 - v,$$

которая должна обязательно обладать устойчивостью по отношению к малым возмущениям:

$$\begin{cases} v = v^{(0)} + \Delta v; v^{(0)} = 1; \\ \frac{dv^{(0)}}{d\tau} + \frac{d\Delta v}{d\tau} = 1 - v^{(0)} - \Delta v; \\ \frac{d\Delta v}{d\tau} = -\Delta v. \end{cases}$$

Другими словами, для малого возмущения мы имеем затухающее решение:

$$\Delta v = C_1 e^{-\tau},$$

или при  $\tau \rightarrow \infty$ ,  $\Delta v \rightarrow 0$ ,  $v \rightarrow v^{(0)}$ . Следовательно, приближенное решение (24) на ограниченном отрезке времени справедливо с заданной точностью.

#### Учет «пограничного» слоя

Для того чтобы удовлетворить второму начальному условию, построим пограничную функцию вида:

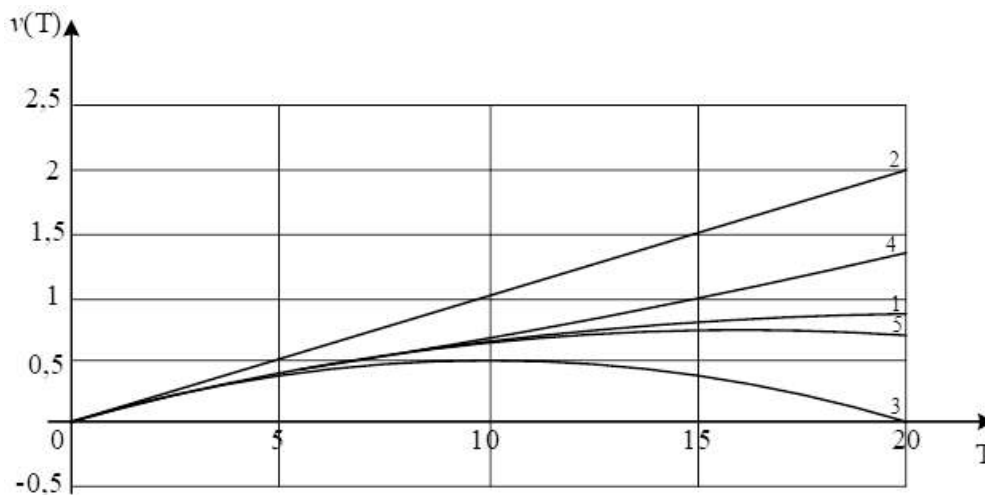


Рис. 1. Приближенные и точное решение задачи:

1 – точное решение; 2 – первое приближение; 3 – второе приближение; 4 – третье приближение; 5 – четвертое приближение

Fig. 1. Approximate and exact solution of the problem:

1 – exact solution; 2 – first approximation; 3 – second approximation; 4 – third approximation; 5 – fourth approximation



$$v = v^{(0)} + v_n,$$

т.е. приближенное решение более высокого порядка составляем из разложений вне пограничного слоя и внутри него. Решение вне пограничного слоя зависит от «медленного» времени  $t$ , а внутри пограничного слоя – от «быстрого» времени  $\tau$ :

$$\mu \left( \frac{dv^{(0)}}{dt} + \frac{dv_n}{d\tau} \right) = 1 - v^{(0)} - v_n, \quad (25)$$

но (25) должно удовлетворять второму начальному условию:

$$\left\{ \begin{array}{l} v = v^{(0)} + v_n(0); \\ v_n(0) = v_0 - v^{(0)}; \\ \frac{dv^{(0)}}{d\tau} = 0; \\ \frac{dv_n}{d\tau} = 1 - v^{(0)} - v_n; \\ v_n = v_n(0)e^{-\tau} = (v_0 - 1)e^{-\tau}, \end{array} \right.$$

таким образом, мы построили следующее приближение:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = x_0 + t; \\ v = 1 + (v_0 - 1)e^{-\tau}, \end{array} \right.$$

однако, в нашей задаче справедливо  $x_0 = 0$  и  $v_0 = 0$ , следовательно,

$$\left\{ \begin{array}{l} x = t; \\ v = 1 - e^{-\tau}. \end{array} \right.$$

Если же мы хотим вычислить медленную составляющую  $x(t)$  с более высокой точностью, то нужно изучить еще одну «возмущенную» систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = v^{(0)} + v_n = 1 + (v_0 - 1)e^{-\tau}; \\ \frac{dv_n}{d\tau} = -v_n. \end{array} \right. \quad (26)$$

Прямое интегрирование (26) встречает очевидные затруднения, так как производная функции  $v_n$  велика. Поэтому примем:

$$x = x^{(0)} + z,$$

и линеаризуем систему относительно  $z$  и  $v_n$ , т.е.:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = \frac{dx^{(0)}}{dt} + \frac{dz}{dt}; \\ \frac{dz}{dt} = v_n = (v_0 - 1)e^{-v}; \\ z = \mu(e^{-\frac{t}{\mu}} - 1); x = t - \mu + \mu e^{-\frac{t}{\mu}}. \end{array} \right.$$

Окончательно, напишем следующие соотношения:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = t - \mu + \mu e^{-\frac{t}{\mu}}; \\ v = 1 - e^{-\frac{t}{\mu}}. \end{array} \right. \quad (27)$$

Точное решение (см. систему (6) второе уравнение), выраженное в безразмерных единицах:

$$x = t - \mu(1 - e^{-\frac{t}{\mu}})$$

абсолютно совпадает с приближенным решением (см. систему (27) первое выражение).

Из представленного здесь решения задачи можно сделать такой вывод, что при учете пограничного слоя приближенные и точные решения полностью совпадают, т.е. теорема академика А.Н. Тихонова о разделении движения системы на «быстрые» и «медленные» составляющие при «больших» временах дала возможность получить точное решение. Конечно, легкость иллюстрации применения теоремы А.Н. Тихонова в данном случае объясняется тем, что был выбран простой пример. Для нелинейных систем находится асимптотика для решений и это часто бывает важно.

Сегодня совсем нетрудно обнаружить целый спектр работ математиков-прикладников по решению различных задач с помощью теоремы о разделении движения системы на «быстрые» и «медленные» составляющие [9–20].

Обратимся к «железнодорожному» примеру, касающемуся тяги поездов, упростив до предела расчетную схему (рис. 2).

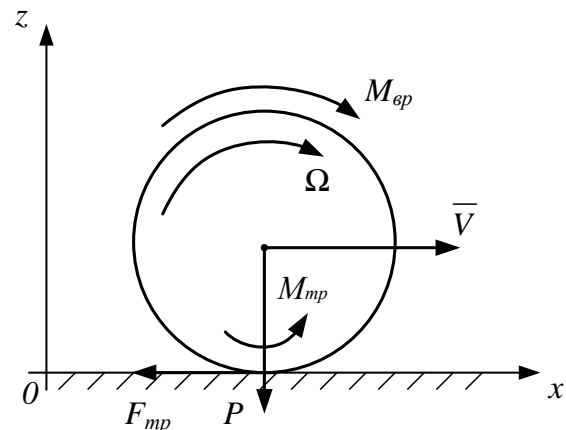


Рис. 2. Простейшая расчетная схема колесной пары для решения некоторых вопросов тяги поездов

Fig. 2. The simplest design scheme of a wheel pair for solving some issues of train traction

Уравнения движения расчетной схемы колесной пары получены с помощью общих теорем динамических систем:

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dT} = F_{\text{тр}} - W(V); \\ 0 = N - P - mg; \\ J \frac{d\Omega}{dT} = M_{\text{вр}} - M_{\text{тр}} - rF_{\text{тр}}, \end{cases} \quad (28)$$

где  $m$  – масса колеса;  $F_{\text{тр}}$  – сила сухого трения;  $N$  – нормальная реакция опорной плоскости;  $P$  – нагрузка на колесо;  $J$  – момент инерции колеса относительно оси вращения;  $M_{\text{вр}}$  – вращающий момент, приложенный к колесу (типом тягового электродвигателя пока пренебрегаем);  $M_{\text{тр}}$  – момент сил трения в подшипнике скольжения;  $r$  – радиус колеса,  $g$  – ускорение свободного падения;  $V$  – скорость движения центра масс колеса;  $\Omega$  – угловая скорость вращения колеса вокруг собственной оси.

Если воспользоваться законом Амонтона–Кулона (в настоящее время широко используемого в технике), т. е.  $F_{\text{тр}} = F_0 \cdot \text{sign}(U)$ , здесь  $U = \Omega r - V$  – скорость проскальзывания колеса по опорной плоскости;  $F_0$  – максимальная сила сухого трения, то система дифференциальных уравнений (28) является системой с разрывной правой частью, исследование которой является довольно сложным делом. При  $U > 0$  осуществляется режим разгона, при  $U < 0$  возникает режим торможения, а при  $U = 0$  колесо движется с постоянным ускорением вдоль опорной поверхности и скорость центра масс колеса изменяется по закону, если считать вращающий момент и момент сил трения постоянными величинами, т. е. происходит равноускоренное движение (в этом случае точка касания колеса и опорной поверхности является мгновенным центром скорости), пройденный катком путь вычисляется по формуле

$$S = \frac{1}{2m} \frac{M_{\text{вр}} - M_{\text{тр}}}{r} \frac{r^2 + \rho^2}{r} T^2. \text{ Конечно же, эти}$$

результаты являются следствием упрощений реальной физической системы. Как подвижная единица наша динамическая система обязана испытывать сопротивление движению внешней среды, чем мы на первых порах пренебрегли.

Целью является установление факта: удержится ли система на этой связи или нет, и как это происходит. Другими словами, не совершается ли данная система фрикционные автоколебания? Из теории тяги поездов известно,

что колесная пара может двигаться либо без колебаний, либо совершать периодические пробуксовки, либо просто буксовать.

В соответствии с требованиями теоремы академика А.Н. Тихонова о разделении движения динамической системы на «быстрые» и «медленные» составляющие преобразуем систему (28) так:

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dT} = F_{\text{тр}} - W(V); \\ \left( \frac{\rho^2}{r} \right) m \frac{dU}{dT} = \left[ 1 + \left( \frac{\rho}{r} \right)^2 \right] F - \frac{M_{\text{вр}} - M_{\text{тр}}}{r}, \end{cases}$$

где  $\rho$  – радиус инерции колеса,  $F_0 = f(P + mg)$  – сила трения,  $U$  – проскальзывание колеса по опорной поверхности. Второе уравнение системы (28) позволило вычислить нормальное давление колеса на опорную поверхность.

Допустим далее, что скорость движения центра масс колеса  $V$  изменяется существенно медленнее, чем скорость проскальзывания колеса по опорной поверхности  $U$ , что обычно имеет место в действительности (например, скорость центра масс поезда сколь-нибудь существенным образом изменяется за десятки секунд, а скорость вращения колесных пар за десятые доли секунды). Следовательно, скорость  $V$  является в нашей задаче медленной переменной, а скорость проскальзывания  $U$  – быстрой переменной.

Нормализуем систему уравнений (28), приняв  $V = vV_*$ ,  $U = uU_*$ ,  $T = tT_*$ :

$$\begin{cases} \frac{T_1}{T_*} \frac{dv}{dt} = \text{sign } u; \\ \frac{T_2}{T_*} \frac{du}{dt} = \left[ 1 + \left( \frac{\rho}{r} \right)^2 \right] \text{sign } u - a, \end{cases} \quad (29)$$

здесь постоянные времени равны:  $T_1 = mV_*/F_0$

,  $T_2 = (\rho/r)^2 mU_*/F_0$ ,  $V_*$  и  $U_*$  – характерные

переменные, которые определяют классы движения принятой динамической системы,

$a = (M_{\text{0вр}} - M_{\text{0тр}})/rF_0$  – постоянная величина

при условии, что вращающий момент и максимальная сила сухого трения являются постоянными величинами. В теории тяги поездов характерные величины  $V_*$  и  $U_*$  связаны известным соотношением  $U_* = \xi V_*$ , где  $\xi = 0,001$  –

0,025. Тогда вторая постоянная времени будет вычисляться по выражению:

$$T_2 = \xi(\rho/r)^2 T_1, \quad (30)$$

а система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \frac{T_1}{T_*} \frac{dv}{dt} = \text{sign } u; \\ \xi \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \frac{T_2}{T_*} \frac{du}{dt} = \left[1 + \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right] \text{sign } u - a, \end{cases} \quad (31)$$

Очевидно, что структура дифференциальных уравнений будет меняться в зависимости от выбора характерного времени  $T_*$ . Если взять  $T_* \ll T_1$ , то система (31) запишется так:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \mu \text{sign } u; \\ \frac{du}{dt} = \mu \left[1 + \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right] \text{sign } u - a \left(\frac{r}{\rho}\right)^2 \frac{1}{\xi}. \end{cases} \quad (32)$$

Система, разумеется, является регулярно возмущенной с малым параметром в правых частях, т. е.  $\mu = T_*/T_1 \ll 1$ , и для нее можно строить асимптотические разложения по малому параметру. Если принять, что  $T_* = T_1$ , то для исследования получим систему дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \mu \text{sign } u; \\ \xi \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \frac{du}{dt} = \left[1 + \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right] \text{sign } u - a. \end{cases} \quad (33)$$

Какой вид решения нужно строить в данном случае зависит от коэффициента  $\xi(\rho/r)^2$ , если он существенно меньше единицы, то левую часть второго уравнения считать равной нулю, тогда получаем:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{r^2}{r^2 + \rho^2} a; \\ \text{sign}(u) = \frac{r^2}{r^2 + \rho^2} - a. \end{cases} \quad (34)$$

Следовательно, безразмерная переменная легко находится и равна:

$$v = v_0 + \frac{r^2}{r^2 + \rho^2} at.$$

Причем система дифференциальных уравнений (33) является сингулярно возмущенной. Конечно же, возникает вопрос об устойчивости решения (34) и на это отвечает теорема академика А.Н. Тихонова, но об этом будет

сказано далее. Третий вариант системы дифференциальных уравнений возникает тогда, когда  $T_* \gg T_1$ :

$$\begin{cases} \varepsilon \frac{dv}{dt} = \text{sign } u; \\ \xi \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \varepsilon \frac{du}{dt} = \left[1 + \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right] \text{sign } u - a, \end{cases}$$

где  $\varepsilon = T_1/T_* \ll 1$  – малый параметр.

В данном примере сила тяги представлялась силой сухого трения, но у профессора С.М. Куценко [21] был другой подход, на базе которого в [22] на основе лабораторных материалов [23] получено регрессионное уравнение:

$$F_k = a F_{\text{тр}} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{кр}}}\right)^b e^{-c \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{кр}}}}, \quad (35)$$

где  $F_{\text{тр}} = f_0 P_{\text{ст}}$ .

График изменения силы тяги, вычисляемой по уравнению регрессии (35) представлен на рис. 3.

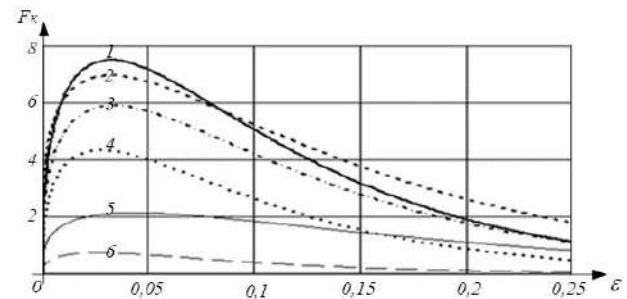


Рис. 3. Сила тяги локомотива:

- 1 – для сухого чистого рельса с подачей песка;
- 2 – для сухого обезжиренного рельса;
- 3 – для сухого чистого рельса;
- 4 – для мокрого рельса с подачей песка;
- 5 – для чистого рельса, политого водой;
- 6 – для рельсов, покрытых тонким слоем смазки трансмиссионных передач

Fig. 3. Locomotive traction force:

- 1 – for dry clean rail with sand supply;
- 2 – for dry decontaminated rail;
- 3 – for dry clean rail;
- 4 – for wet rail with sand supply;
- 5 – for clean rail poured with water;
- 6 – for rails covered with a thin layer of transmission gear lubricant

На падающих ветвях силы тяги локомотива, когда  $\varepsilon \geq \varepsilon_{\text{кр}}$ , возникает и развивается боксование колесной пары. Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $\varepsilon_{\text{кр}}$  определены для различных условий контактирования колесной пары с рельсами с использованием уравнения (22) и приведены в табл. 1. Для сухого чистого рельса находим, что мак-

симальная сила тяги одной колесной пары локомотива составляет около 5,8 тс.

При проведении экспериментальных исследований с поездами, ведомыми ВЛ-10 или ВЛ-11, Л.А. Мугинштейн нашел максимальное значение равное 0,252, а О.А. Некрасов для ВЛ-80, ВЛ-60 – 0,265. Эти результаты хорошо коррелируются с данными, представленными в табл. 2.

Укажем на следующий известный факт, представленный в докладе Академии наук РФ за 2009 г., в котором обновлено понимание силы сухого трения. Сотрудниками академика В.Ф. Журавлёва были выполнены соответствующие лабораторные исследования по двухкомпонентному сухому трению, когда к исследуемому объекту прикладывались горизонтальная сила и вращающий момент, а применение аппроксимации Падэ позволило получить соответствующие регрессионные выражения [24–29]. Прошло почти 14 лет, но научные сотрудники железнодорожного транспорта в своей практике этим не пользуются. В транспортной механике данный подход принципиально важен, ибо к колесной паре кроме горизонтальной силы тяги еще приложен и вращающий момент тягового двигателя.

Другие примеры можно обнаружить в работах [14, 17, 18, 22], которые имеют достаточно большой объем и их изучение может помочь читателю в овладении математическими аспек-

тами теоремы академика А.Н. Тихонова. Анализ статей, посвященных динамике подвижного состава железных дорог, позволяет авторам прогнозировать смену парадигмы математических моделей с обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами на обыкновенные дифференциальные уравнения с переменными (или случайными) коэффициентами. Эти дифференциальные уравнения не изучаются в технических вузах. Всем железнодорожникам известно – вертикальная жесткость пути переменная по длине рельсового звена (рис. 4), но до сих пор корректно этот факт не учитывался, что совершенно неправильно. При движении колесной пары экипажа по такому пути она будет совершать колебательные движения. Когда жесткость пути постоянна, то никаких движений колесная пара совершать не будет – это принципиально неправильно. В дальнейшем необходимо разрабатывать методику решения таких задач, так как высшая математика не предлагает нам регулярных методов их интегрирования.

### Заключение

Исследуемая динамическая система должна содержать весь спектр переменных, часто для «быстрых» составляющих задачи дифференциальные уравнения приходится выводить из (3), например, сила взаимодействия колеса с рельсом определяется их псевдоскольжением друг

Табл. 1. Коэффициенты регрессионного уравнения (22)

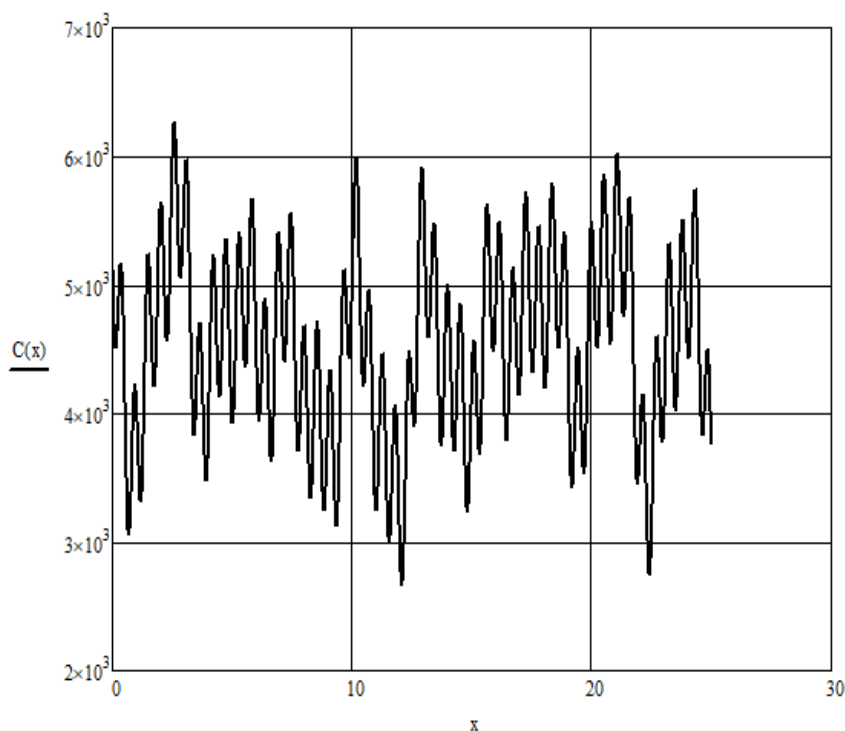
Table 1. Coefficients of the regression equation (22)

Условия на контакте колеса с рельсом	$a$	$b$	$c$	$\epsilon_{кр}$	$f_{сч\ max}/f_0$	Коэффициент корреляции
Сухой чистый рельс с подачей песка	0,88454	0,41034	0,40645	0,032	0,5891	0,99264
Сухой обезжиренный рельс	0,72771	0,28755	0,28888	0,032	0,5451	0,99767
Сухой чистый рельс	0,71693	0,37933	0,37605	0,033	0,4922	0,9955
Мокрый рельс с подачей песка	0,62734	0,38389	0,37349	0,027	0,4318	0,97756
Чистый рельс, политый водой	0,35161	0,32744	0,33716	0,045	0,2510	0,99737
Рельс, покрытый тонким слоем смазки трансмиссионных передач	0,24823	0,43601	0,43151	0,026	0,1612	0,9824

Таблица 2. Значение потенциального коэффициента сцепления колеса с рельсом

Table 2. The potential coefficient value of wheel to the rail cohesion

Условия контактирования колеса с рельсом	$\Psi_{\max}$
Сухой чистый рельс с подачей песка	0,300
Сухой обезжиренный рельс	0,278
Сухой чистый рельс	0,236
Мокрый рельс с подачей песка	0,173
Чистый рельс, политый водой	0,085
Рельс, покрытый тонким слоем смазки трансмиссионных передач	0,029



**Рис. 4.** Вертикальная жесткость железнодорожного пути в Сибирском регионе (средняя жесткость на звене составляет 4560 летом), тс/м

**Fig. 4.** Vertical rigidity of the railway track in the Siberian region (the average rigidity on the link is 4560 in summer), ts/m

по другу. Для данной переменной обычно нет дифференциального уравнения, его необходимо вывести из исходной системы, чтобы привести заданную систему к виду (1).

Использование теоремы академика А.Н. Тихонова о разделении движений динамической системы на «медленные» и «быстрые» составляющие позволяет после вырождения

точной системы, получить динамическую систему меньшей размерности. Причем даже при использовании численных методов интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений их математическая проработка позволит принять большой шаг интегрирования, что уменьшит затраты «машинного» времени.

#### Список литературы

1. Клайн С. Дж. Подобие и приближенные методы. М. : Мир, 1968. 302 с.
2. Вазов В. Асимптотические разложения решений обыкновенных дифференциальных уравнений. М. : Мир, 1968. 464 с.
3. Мищенко Е.Ф., Розов Н.Х. Дифференциальные уравнения с малым параметром и релаксационные колебания. М. : Наука, 1975. 247 с.
4. Тихонов А.Н., Васильева А.Б., Свешников А.Г. Дифференциальные уравнения. М.: Наука, 1985. 231 с.
5. Тихонов А.Н. Системы дифференциальных уравнений, содержащие малые параметры при производных // Математический сборник. 1952. Т. 31 (73). № 3. С. 575–586.
6. Васильева А.Б., Бутусов В.Ф. Асимптотические разложения решений сингулярно возмущенных уравнений. М. : Наука, 1973. 272 с.
7. Красовский Н.Н., Климушев А.И. Равномерная асимптотическая устойчивость систем дифференциальных уравнений с малым параметром при старших производных // Успехи математических наук. 1963. Т. 18. № 3. С. 680–690.
8. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью // Математический сборник. 1960. Т. 51. № 1. С. 99–128.
9. Новожилов И.В. Приближенные методы исследования динамических систем. М. : МЭИ, 1980. 47 с.
10. Новожилов И.В. Методы разделения движений. М. : МЭИ, 1981. 48 р.
11. Новожилов И.В. Теория размерности и приближенные методы. М. : МЭИ, 1987. 76 с.
12. Новожилов И.В. Приближенные методы исследования гироскопических систем. Развитие механики гироскопических и инерциальных систем. М. : МЭИ, 1973. 456 с.

13. Градштейн И.С. О решениях на временной полупрямой дифференциальных уравнений с малыми множителями при производных // Математический сборник. 1953. Т. 32. С. 533 – 544.
14. Капустина О.М., Новожилов И.В. Разделение движений в динамике экипажа с неконтактной подвеской // Межвузовский тематический сборник. 1983. № 16. С. 36 – 42.
15. Брагин В.В., Новожилов И.В., Пшеничкина Л.А. Об устойчивости трехосного индикаторного гиросtabilизатора // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1969. № 6. С. 26 – 33.
16. Новожилов И.В. Предельная модель системы с упругими элементами большой жесткости // Изв. АН СССР. 1988. № 4. С. 24–27.
17. Новожилов И.В. Разделение движений рельсового экипажа // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1980. № 1. С. 55 – 59.
18. Копылов И.А., Новожилов И.В. Поперечные колебания железнодорожного поезда // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1985. № 4. С. 64–70.
19. Новожилов И.В. Условия застоя в системах с кулоновым трением // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1973. № 1. С. 8 – 14.
20. Новожилов И.В. Фракционный анализ. М. : МГУ, 1991. 188 с.
21. Игнатенко В.П., Куценко С.М., Гулякина Т.В. О характере сил трения в контакте катящегося по направляющей колеса // Вестник Харьк. политехнич. ин-та. 1985. № 99. С. 39–41.
22. Нехаев В.А. Оптимизация режимов ведения поезда с учетом критериев безопасности движения (методы и алгоритмы) : дис. ... док-ра техн. наук. Омск, 2000. 356 с.
23. Голубенко А.Л. Сцепление колеса с рельсом. Киев : Віпол, 1993. 448 с.
24. Журавлёв В.Ф. О модели сухого трения в задаче о качения твердых тел // Прикладная математика и механика. 1998. Т. 62. № 5. С. 762–767.
25. Киреевков А.А. О движении однородного вращающегося диска по плоскости в условиях комбинированного трения // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2002. № 1. С. 60–67.
26. Киреевков А.А. Метод вычисления силы трения и момента сил трения в комбинированной модели сухого трения для круговых площадок контакта // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2003. № 3. С. 48–53.
27. Журавлёв В.Ф. Закономерности трения при комбинации скольжения и верчения // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2003. № 4. С. 81–88.
28. Иванов А.П. О движении плоских тел при наличии трения покоя // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2003. № 4. С. 89–94.
29. Журавлёв В.Ф., Киреевков А.А. О разложениях Падэ в задаче о двумерном кулоновом трении // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2005. № 2. С. 192–202.

### References

1. Kline S. J. Podobie i priblizhennye metody [Similitude and approximation methods]. Moscow: Mir Publ., 1968. 302 p.
2. Vazov W. Asimptoticheskie razlozheniya reshenii obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii [Asymptotic expansions for ordinary differential equations]. Moscow: Mir Publ., 1968. 464 p.
3. Mishchenko E.F., Rozov N.Kh. Differentsial'nye uravneniya s malym parametrom i relaksatsionnye kolebaniya [Differential equations with a small parameter and relaxation oscillations]. Moscow: Nauka Publ., 1975. 247 p.
4. Tikhonov A.N., Vasil'eva A.B., Sveshnikov A.G. Differentsial'nye uravneniya [Differential equations]. Moscow: Nauka, 1985. 231 p.
5. Tikhonov A.N. Sistemy differentsial'nykh uravnenii, sodержashchie malye parametry pri proizvodnykh [Systems of differential equations containing small parameters at derivatives]. *Matematicheskii sbornik* [Sbornik: Mathematics], 1952, vol. 31(73), no. 3, pp. 575 – 586.
6. Vasil'eva A.B., Butusov V.F. Asimptoticheskie razlozheniya reshenii singulyarno vozmushchennykh uravnenii [Asymptotic expansions of solutions of singularly perturbed equations]. Moscow: Nauka Publ., 1973. 272 p.
7. Krasovskii N.N., Klimushev A.I. Ravnornaya asimptoticheskaya ustoichivost' sistem differentsial'nykh uravnenii s malym parametrom pri starshikh proizvodnykh [Uniform asymptotic stability of systems of differential equations with a small parameter at higher derivatives]. *Uspekhi matematicheskikh nauk* [Russian Mathematical Surveys], 1963, vol. 18, no. 3, pp. 680-690.
8. Filippov A.F. Differentsial'nye uravneniya s razryvnoi pravoii chast'yu [Differential equations with a discontinuous right-hand side]. *Matematicheskii sbornik* [Sbornik: Mathematics], 1960, vol. 51, no. 1, pp. 99-128.
9. Novozhilov I.V. Priblizhennye metody issledovaniya dinamicheskikh sistem [Approximate methods for studying dynamical systems]. Moscow: MEI Publ., 1980. 47 p.
10. Novozhilov I.V. Metody razdeleniya dvizhenii [Methods of separation of movements]. Moscow: MEI, 1981. 48 p.
11. Novozhilov I.V. Teoriya razmernosti i priblizhennye metody [Dimension theory and approximate methods]. Moscow: MEI Publ., 1987. 76 p.
12. Novozhilov I.V. Priblizhennye metody issledovaniya giroskopicheskikh sistem. Razvitie mekhaniki giroskopicheskikh i inertial'nykh sistem [Approximate Methods for Studying Gyroscopic Systems. Development of the mechanics of gyroscopic and inertial systems]. Moscow: MEI Publ., 1973. 456 p.
13. Gradshtein I.S. O resheniyakh na vremennoi polupryamoii differentsial'nykh uravnenii s malymi mnozhitelyami pri proizvodnykh [On solutions on the time half-line of differential equations with small factors at derivatives]. *Matematicheskii sbornik* [Sbornik: Mathematics], 1953, vol. 32, pp. 533-544.

14. Kapustina O.M., Novozhilov I.V. Razdelenie dvizhenii v dinamike ekipazha s nekontaktnoi podveskoi [Separation of movements in the dynamics of a vehicle with non-contact suspension]. *Mezhvuzovskii tematiceskii sbornik* [Interuniversity thematic proceedings], 1983, no. 16, pp. 36-42.
15. Bragin V.V., Novozhilov I.V., Pshenichkina L.A. Ob ustoychivosti trekhosnogo indikatornogo girostabilizatora [On the stability of a triaxial indicator gyrostabilizer]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletins of Academy of Sciences USSR. Mechanics of Solids], 1969, no. 6, pp. 26-33.
16. Novozhilov I.V. Predel'naya model' sistemy s uprugimi elementami bol'shoi zhestkosti [Limit model of a system with elastic elements of high rigidity]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletins of Academy of Sciences USSR], 1988, no. 4, pp. 24-27.
17. Novozhilov I.V. Razdelenie dvizhenii rel'sovogo ekipazha [Separation of motions of a rail vehicle]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletins of Academy of Sciences USSR. Mechanics of Solids], 1980, no. 1, pp. 55-59.
18. Kopylov I.A., Novozhilov I.V. Poperechnye kolebaniya zheleznodorozhnogo poezda [Transverse vibrations of a railway train]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletins of Academy of Sciences USSR. Mechanics of Solids], 1985, no. 4, pp. 64-70.
19. Novozhilov I.V. Usloviya zastoya v sistemakh s kulonovym treniem [Stagnation Conditions in Systems with Coulomb Friction]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletins of Academy of Sciences USSR. Mechanics of Solids], 1973, no. 1, pp. 8-14.
20. Novozhilov I.V. Fraktsionnyi analiz [Fractional analysis]. Moscow: MGU Publ., 1991. 188 p.
21. Ignatenko V.P., Kutsenko S.M., Gulyakina T.V. O kharaktere sil treniya v kontakte katyashchegosya po napravlyayushchei kolese [On the nature of the friction forces in contact of the wheel rolling along the guide]. *Vestnik Khar'kovskogo politekhnicheskogo instituta* [Bulletin of the Kharkiv Polytechnic Institute], 1985, no. 99, pp. 39 – 41.
22. Nekhaev V.A. Optimizatsiya rezhimov vedeniya poezda s uchetom kriteriev bezopasnosti dvizheniya (metody i algoritmy) [Optimization of train driving modes taking into account traffic safety criteria (methods and algorithms)]. Doctor's thesis. Omsk, 2000. 356 p.
23. Golubenko A.L. Stseplenie kolese s rel'som [Wheel coupling with rail]. Kiev: Vipol Publ., 1993. 448 p.
24. Zhuravlev V.F. O modeli suhogo treniya v zadache o kachenii tverdykh tel [On the dry friction model in the rolling problem of solids]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Applied Mathematics and Mechanics], 1998, vol. 62, no. 5, pp. 762 – 767.
25. Kireenkov A.A. O dvizhenii odnorodnogo vrashchayushchegosya diska po ploskosti v usloviyakh kombinirovannogo treniya [On the motion of a homogeneous rotating disk along a plane under conditions of combined friction]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletins of the Russian Academic Science. Mechanics of Solids], 2002, no. 1, pp. 60-67.
26. Kireenkov A.A. Metod vychisleniya sily treniya i momenta sil treniya v kombinirovannoi modeli sukhogo treniya dlya krugovykh ploshchadok kontakta [A method for calculating the friction force and the moment of friction forces in a combined dry friction model for circular contact pads]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletins of the Russian Academic Science. Mechanics of Solids], 2003, no. 3, pp. 48 – 53.
27. Zhuravlev V.F. Zakonomernosti treniya pri kombinatsii skol'zheniya i vercheniya [Regularities of friction in the combination of sliding and twisting]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletins of the Russian Academic Science. Mechanics of Solids], 2003, no. 4, pp. 81 – 88.
28. Ivanov A.P. O dvizhenii ploskikh tel pri nalichii treniya pokoya [On the motion of flat bodies in the presence of rest friction]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletins of the Russian Academic Science. Mechanics of Solids], 2003, no. 4, pp. 89 – 94.
29. Zhuravlev V.F., Kireenkov A.A. O razlozheniyakh Padi v zadache o dvumernom kulonovskom trenii [On Pad decompositions in the problem of two-dimensional Coulomb friction]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletins of the Russian Academic Science. Mechanics of Solids], 2005, no. 2, pp. 192 – 202.

### Информация об авторах

**Нехаев Виктор Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: nehaevva@rambler.ru.

**Николаев Виктор Александрович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: NikolaevVA@omgups.ru.

**Леоненко Елена Геннадьевна**, преподаватель электромеханического отделения, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск, e-mail: leonenko-eg@mail.ru.

### Information about the authors

**Viktor A. Nekhaev**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: nehaevva@rambler.ru.

**Viktor A. Nikolaev**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: NikolaevVA@omgups.ru.

**Elena G. Leonenko**, Lecturer of the Department of Electromechanics, Krasnoyarsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, e-mail: leonenko-eg@mail.ru.

## Разработка и исследование двухцилиндрового многоступенчатого насосного гидропривода технологических машин

А.П. Потапенков, С.С. Пилипенко ✉

Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск, Российская Федерация

✉pilipenko@norvuz.ru

### Резюме

В статье представлен пятиступенчатый двухцилиндровый насосный редукторно-мультипликаторный гидропривод на базе простого двоярного редуктора и двоярного блочного редуктора-мультипликатора. Редуктор состоит из входного и двух равных выходных (дозировочных) цилиндров и обеспечивает редукторную ступень (увеличение скорости и давления насосов) при холостом ходе. Блочный редуктор-мультипликатор состоит из входного и двух пар (равных в паре и неравных между парами) выходных цилиндров и обеспечивает редукторную и две мультипликаторные ступени (снижение скорости и давления насосов) при рабочем ходе. Режим функционирования редуктора-мультипликатора обеспечивается сочетанием выходных цилиндров, подающих жидкость в силовые цилиндры, путем переключения части из них на слив. С этими четырьмя ступенями сочетается ступень подачи жидкости в силовые цилиндры через делитель потока (насосная ступень). Многоступенчатый привод целесообразно использовать при плавно возрастающей нагрузке на всей величине рабочего хода (операции осадки, вытяжки). Выполнен анализ последовательного сочетания пяти ступеней (редукторная при холостом ходе, редукторная, насосная и две мультипликаторные при рабочем ходе) для линейно возрастающей силовой нагрузки, которую определяют начальное давление  $P_0$  и максимальное в конце рабочего хода  $P_{\max}$ . Анализ выполнен при условиях равенства давления и мощности насосов по ступеням и условию равенства времени прямого хода сравниваемых (простого и разработанного) приводов. Оценивается соотношение мощностей насосов. В результате исследования получены зависимости основных параметров разработанного привода, коэффициенты редукции и мультипликации. При принятых исходных данных возможно снижение давления и мощности насосов на 34–40 % (по сравнению с простым гидроприводом). В идеальном варианте полного использования мощности насосов это снижение составляет 39,5–46 %. Следующий вариант привода, исполненный только на базе двоярного блочного редуктора-мультипликатора обеспечивает четыре ступени. В работе анализируется последовательное сочетание редукторной, насосной и двух мультипликаторных ступеней. При этом редукторная ступень охватывает холостой ход и начальную часть рабочего хода. При сравнимых исходных данных этот вариант обеспечивает снижение давления и мощности насосов на 30–34 %, что на 4–6 % меньше по сравнению с пятиступенчатым приводом.

### Ключевые слова

гидропривод, редуктор-мультипликатор, давление и мощность насосов, редукция, мультипликация

### Для цитирования

Потапенков А.П. Разработка и исследование двухцилиндрового многоступенчатого насосного гидропривода технологических машин / А.П. Потапенков, С.С. Пилипенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2(74). – С. 47–56. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).47-56.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 19.05.2022 г.; поступила после рецензирования: 24.06.2022 г.; принята к публикации: 27.06.2022 г.

## Development and research of two-cylinder multi-stage pumping hydraulic drive of technological machines

A.P. Potapenkov, S.S. Pilipenko ✉

Polar Stat University named after N.M. Fedorovskii, Norilsk, the Russian Federation

✉pilipenko@norvuz.ru

### Abstract

A five-stage two-cylinder pumping gear–multiplier hydraulic drive based on a simple dual gearbox and a dual block gearbox - multiplier is presented in the article. The gearbox consists of an input and two equal output (metering) cylinders and provides a gear stage (the speed and pressure of the pumps increases) at idle. The block reducer–multiplier consists of an input and two pairs (equal in a pair and unequal between pairs) of output cylinders and provides a reducer and two multipliers (the speed and pressure of pumps decreases) during the working stroke. The operation mode of the multiplier gearbox is provided by a combination of output cylinders supplying fluid to the power cylinders by switching part of them to drain. These four stages are combined with the stage of liquid supply to the power cylinders through the flow divider (pump stage). It is advisable to use a multi-stage drive with a smoothly increasing load on the entire value of the working stroke (operation of precipitation, extraction). The anal-



ysis is performed of a sequential combination of five stages (gear at idle, gear, pumping and two multipliers at working stroke) for a linearly increasing power load, which is determined by the pressure at the beginning of  $P_0$  and the maximum at the end of the working stroke  $P_{\max}$ . The analysis was performed under the condition of equality of pressure and pump power by stages and the condition of equality of the forward running time of comparable (simple and developed) drives. The ratio of pump capacities is estimated. The dependences of the main parameters of the developed drive, reduction and multiplication coefficients are obtained. With the accepted initial data, it is possible to reduce the pressure and power of the pumps by 34–40% (as compared with a simple hydraulic drive). In the ideal case of full use of pump power, this reduction is 39,5 – 46%. The next version of the drive, executed only on the basis of a dual block multiplier gearbox, provides four stages. The analysis of the sequential combination of gear, pump and two multiplier stages is performed. Herewith, the gear stage covers the idling and the initial part of the working stroke. With comparable initial data, this option provides a reduction in pressure and pump power by 30 – 34%. This is 4–6% less compared to the five-speed drive.

### Keywords

hydraulic drive, gear multiplier, pump pressure and power, reduction, animation

### For citation

Potapenkov A.P., Pilipenko S.S. Razrabotka i issledovanie dvukhtsilindrovogo mnogostupenchatogo nasosnogo gidroprivoda tekhnologicheskikh mashin [Development and research of two-cylinder multi-stage pumping hydraulic drive of technological machines]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2(74), pp. 47–56. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).47-56.

### Article info

Received: May 19, 2022; revised: June 24, 2022; accepted: June 27, 2022.

### Введение

Простой и экономичный насосный гидропривод с насосами постоянной подачи широко используется в различных металлургических машинах [1–6]. Существенный недостаток таких приводов – значительная установочная мощность насосов [7–15]. Следовательно, основным направлением их совершенствования является снижение этой мощности. Достигается это, в частности, приближением режима нагружения насосов к характеристике так называемого «идеального» насоса, для которого  $P_n, Q_n = \text{const}$ , где  $P_n, Q_n$  – соответственно давление (напор) и подача насосов. При ступенчатом приближении эффективность решения этой задачи будет возрастать с увеличением числа ступеней.

Известен вариант использования режимов редуцирования и мультипликации для ступенчатого регулирования давления насосов при их постоянной подаче, что делает привод редуцирующе-мультипликаторным [9, 16–18]. Режим редуцирования на участках низкой нагрузки увеличивает давление насосов, на участках высокой нагрузки – снижает. Разработаны и исследованы двух- и трехступенчатые редуцирующе-мультипликаторные приводы [16–24]. При использовании сдвоенных редукторов и мультипликаторов (сдвоенных дозаторов) дополнительно решается задача синхронизации движения цилиндров двухцилиндрового силового блока [16].

Целью данной работы является разработка многоступенчатых двухцилиндровых реду-

торно-мультипликаторных гидроприводов машин и оценка их эффективности.

### Состав и функционирование разработанных приводов

Разработана схема пятиступенчатого привода с двухцилиндровым силовым блоком на базе сдвоенных дозаторов (рис.1).

Привод включает силовой блок 1 в составе двух силовых 2 и двух возвратных 3 цилиндров; насосную станцию 4; простой сдвоенный редуктор 5 с входным 6 и двумя выходными 7 цилиндрами; сдвоенный блочный редуктор-мультипликатор 9 в составе входного цилиндра 10 и двух пар равных в паре и неравных между парами, выходных цилиндров 11 и 12. Система гидроаппаратов: реверсивный золотник 14; семь трехходовых двухпозиционных золотников переключения ступеней давления (15, 17, 29–33); восемь отсечных золотников (19, 20, 23–28); два делителя потока (16, 18).

Все ступени давления осуществляются при переключении золотника 14 в позицию прямого хода. Включением редуктора 5 при холостом ходе обеспечивается редуцирующая ступень. Жидкость от насоса через золотники 14, 17 и 29 подается во входной цилиндр 6 ( $D_p$ ) и вытесняется двумя равными потоками из выходных цилиндров 7 ( $d_p$ ) в силовые цилиндры. Коэффициент редукиции:

$$K_p = D_p^2 / (2d_p^2) < 1. \quad (1)$$

При редуцировании скорость движения плунжеров силовых цилиндров  $V_p$  и давление насосов  $P_{np}$  определяются как

$$V_p = \frac{Q_n}{2F_n K_p} = \frac{V_n}{K_p}; P_{np} = \frac{R_n}{2F_n K_p} = \frac{P_n}{K_p}, \quad (2)$$

где  $V_n = Q_n / (2F_n)$ ,  $P_n = R / (2F_n)$  – скорость силовых цилиндров и давление насосов при соединении насосов непосредственно с силовыми цилиндрами;  $Q_n$  – подача насосов;  $R$  – силовая нагрузка;  $F_n$  – площадь цилиндров силового блока.

Включением редуктора-мультипликатора 9 обеспечиваются три ступени давления. Жидкость от насосов поступает во входной цилиндр

10 ( $D$ ) и вытесняется, двумя равными потоками из выходных цилиндров 11 ( $d_1$ ) и 12 ( $d_2$ ). Степень редуцирования определяется соотношением диаметров плунжеров входного ( $D$ ) и выходных ( $d_1$  и  $d_2$ ) цилиндров и числом выходных цилиндров, подающих жидкость в силовые цилиндры. Отключение выходных цилиндров от силовых и их соединение со сливом обеспечивается переключением соответствующих золотников (30–33) на вторую позицию.

Для всех случаев выполняется соотношение  $D^2 > 2d_1^2 > 2d_2^2$ . При этом последовательная раздельная подача жидкости из одной пары выходных цилиндров обеспечивает мультипликаторный режим с коэффициентами мультипли-

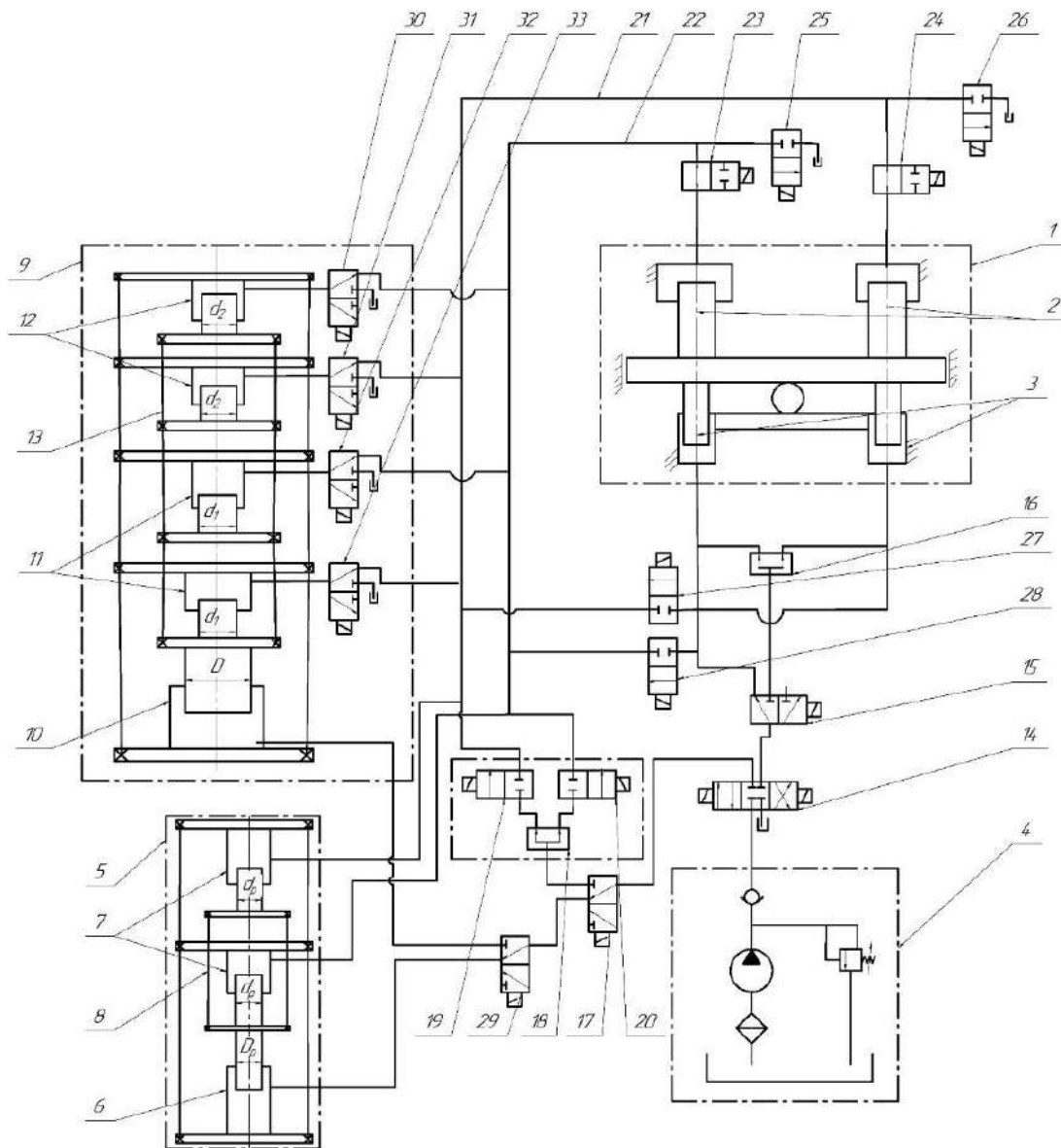


Рис. 1. Схема пятиступенчатого двухцилиндрового привода  
Fig. 1. Scheme of a five stage two-cylinder drive

кации  $K_{M1}$  и  $K_{M2}$  ( $K_{M1} < K_{M2}$ ):

$$K_{M1} = D^2/(2d_1^2); K_{M2} = D^2/(2d_2^2). \quad (3)$$

При подаче жидкости из всех выходных цилиндров может осуществляться редукторный или мультипликаторный режим с коэффициентом ( $K_{MP}$ ):

$$K_{MP} = D^2/[2(d_1^2 + d_2^2)] \quad (4)$$

Мультипликаторный режим будет иметь место при  $D^2 > 2(d_1^2 + d_2^2)$ , при этом  $1 < K_{MP} < K_{M1} < K_{M2}$ ; при  $D^2 < 2(d_1^2 + d_2^2)$ , будет иметь место редукторный режим и  $K_P < K_{MP} < 1$ .

При мультипликаторных режимах скорость движения силовых цилиндров  $V_M$  и давление насосов  $P_{HM}$  определяются как

$$V_M = \frac{Q_H}{2F_{II}K_M} = \frac{V_H}{K_M}; P_{HM} = \frac{R}{2F_{II}K_M} = \frac{P_H}{K_M}. \quad (5)$$

Схема обеспечивает также насосную ступень давления, при которой жидкость от насосов через золотники 14 и 17 подается на вход делителя потока 18 и далее двумя равными потоками в силовые цилиндры через золотники 19 и 20 после их переключения, скорость силовых цилиндров и давление насосов соответственно  $V_H$  и  $P_H$  (2).

В итоге привод может обеспечить при прямом ходе пять ступеней давления в двух вариантах. В обоих вариантах осуществляется редукторная ступень при холостом ходе ( $K_P$ ) из выражения (1) с включением редуктора 5. При рабочем ходе в двух вариантах осуществляется насосная ступень и три ступени с включением редуктора-мультипликатора 9. В первом варианте последовательно осуществляются редукторная ступень ( $K_{MP}$ ) (4), насосная и две мультипликаторные ступени ( $K_{M1}$  и  $K_{M2}$ ) в соответствии с (3); во втором варианте – насосная ступень и три мультипликаторные ступени ( $K_{MP}$ ;  $K_{M1}$ ;  $K_{M2}$ ).

Блочная компоновка цилиндров редуктора-мультипликатора определяет взаимозависимость коэффициентов ( $K_{MP}$ ,  $K_{M1}$  и  $K_{M2}$ ). С учетом (3) и (4):

$$K_{MP} = K_{M1} \cdot K_{M2} / (K_{M1} + K_{M2}). \quad (6)$$

Обратный ход осуществляется при переключении золотника 14 в позицию обратного хода. Жидкость от насосов поступает в возвратные цилиндры 3 через золотник 15 и вытесняется из силовых цилиндров 2 в выходные цилиндры 7 редуктора 5; жидкость из входного цилиндра 6 вытесняется на слив через золотники 29, 17 и 14. При выходе блока плунжеров 8 в

исходное положение переключается золотник 29. Жидкость из силовых цилиндров при этом перетекает в выходные цилиндры 11 и 12 редуктора-мультипликатора 9; жидкость из выходного цилиндра 10 также сливается через золотники 29, 17 и 14.

Объем жидкости в силовых цилиндрах в конце прямого хода может превышать объем жидкости, необходимый для зарядки редуктора и редуктора-мультипликатора, или может быть меньше этого объема. При первом соотношении объемов сначала в исходное положение выходит блок плунжеров 13 редуктора-мультипликатора; при втором соотношении – блок плунжеров силового блока. С учетом этого обратный ход заканчивается по одному из двух вариантов. При первом варианте открываются отсечные золотники 25 и 26 и переключается золотник 15; жидкость от насосов в возвратные цилиндры поступает через делитель потока 16 и остаток жидкости из силовых цилиндров сливается через золотники 25 и 26. При втором варианте открываются золотники 27 и 28 и закрываются золотники 23 и 24; жидкость от насосов через золотники 27 и 28 заполняет полости выходных цилиндров редуктора-мультипликатора, золотники 23 и 24 отсекают силовые цилиндры от напорной магистрали. Если исключить из состава рассмотренного привода сдвоенный простой редуктор 5 вместе с двухпозиционным трехходовым золотником 29, мы делаем его четырехступенчатым. При этом трубопровод, соединяющий золотники 17 и 29, мы подключаем к цилиндру 10 сдвоенного блочного редуктора-мультипликатора 9. Привод в этом варианте последовательно обеспечивает четыре ступени: редукторная, насосная, и две мультипликаторные.

### Оценка эффективности пятиступенчатого привода

Силовые и кинематические параметры привода определяются графиком силового нагружения при прямом ходе и скоростным режимом в течение рабочего цикла, который состоит из прямого хода (холостой и рабочий ход) и обратного хода. Многоступенчатый привод целесообразно использовать при плавном возрастающей нагрузке на всей величине рабочего хода. Примерами такой нагрузки могут быть операции осадки, вытяжки [7]. Силовую

нагрузку в этом случае можно представить линейной зависимостью давления в силовых цилиндрах в функции от перемещения плунжеров силового блока  $P = f(S)$  (рис. 2).

Линия этой зависимости проходит через точки начального давления  $P_0$  и максимального давления  $P_{max}$  рабочего хода.

При примерном анализе привода рассмотрим более приемлемый первый вариант сочетания ступеней давления, при котором последовательно осуществляются редукторная ступень холостого хода и четыре ступени рабочего хода: редукторная, насосная и две мультипликаторные (рис.2).

Исходными условиями сравнительного анализа принимаем равенство мощностей на всех ступенях давления и равенство времени прямого хода при использовании данного при-

вода ( $t_2$ ) и при использовании простого насосного привода ( $t_1$ ). При этом оцениваем соотношение мощностей ( $n = N_2 / N_1$ ) рассматриваемого привода ( $N_2$ ) и простого привода ( $N_1$ ). Эти условия:

$$\begin{aligned} N_2 = N_p = N_{pm} = N_n = N_{m1} = N_{m2}; \\ t_1 = t_2; \\ n = N_2 / N_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Для универсальности результатов анализа введем параметры относительного перемещения ( $a = S_x / S_{\pi}$  – ступень холостого хода;  $a_p = S_{pm} / S_{\pi}$  – редукторная ступень рабочего хода;  $c = S_n / S_{\pi}$  – насосная ступень;  $d_1 = S_{m1} / S_{\pi}$ ,  $d_2 = S_{m2} / S_{\pi}$  – мультипликаторные ступени) и относительной нагрузки ( $b = P_x / P_{max}$  – давление холостого хода;  $b_0 = P_0 / P_{max}$  – начальное давление рабочего хода;  $b_n = P_n / P_{max}$  – максимальное давление насосной ступени

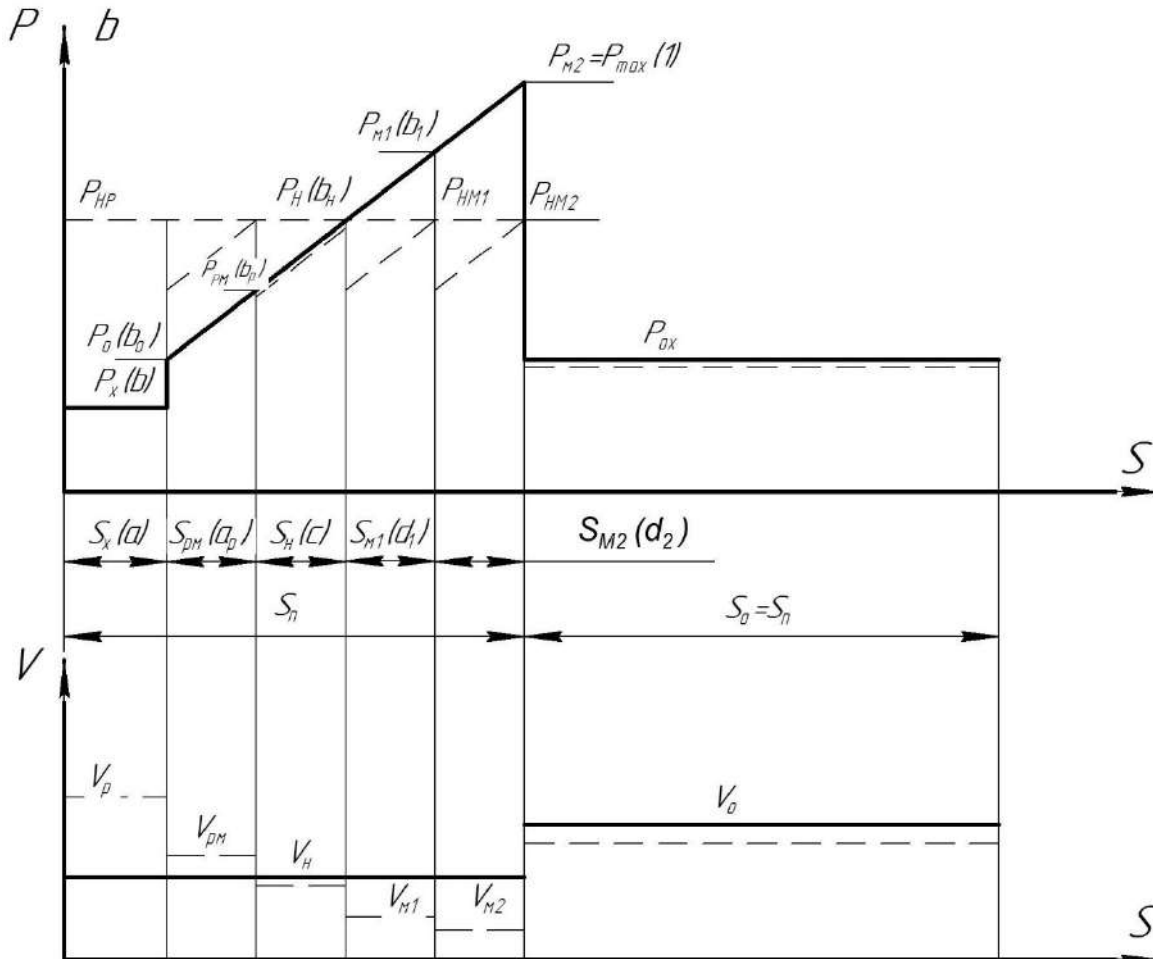


Рис. 2. Графики давления  $P = f(S)$  и скорости  $V = f(S)$  (сплошная линия для простого привода, пунктирная линия для редукторно-мультипликаторного привода (пятиступенчатого))

Fig. 2. Graphs of pressure  $P = f(S)$  and velocity  $V = f(S)$  (solid line is for the simple drive, dotted line is for gear-multiplier (five stage) drive)

(номинальное давление насосов);  $b_1 = P_{M1} / P_{max}$  и  $b_2 = P_{M2} / P_{max} = 1$  – максимальное давление первой и второй мультипликаторных ступеней;  $b_p = P_{PM} / P_{max}$  – максимальное давление редукторной ступени рабочего хода).

Для простого насосного привода давление насосов ( $P_H$ ), мощность насосов ( $N_1$ ), скорость прямого хода ( $V_H$ ) и время прямого хода ( $t_1$ ) определяются зависимостями:

$$P_H = \frac{R}{2S_H}; V_H = \frac{Q_H}{2S_H}; N_1 = P_{max} \cdot Q_H; t_1 = S_H / V_H \quad (8)$$

Для рассматриваемого привода с учетом (2) и (5) и принятых условий (7) следует:

$$N_2 = (P_x / K_p) \cdot Q_H = (P_{PM} / K_{PM}) \cdot Q_H = P_H Q_H = (P_{M1} / K_{M1}) \cdot Q_H = (P_{M2} / K_{M2}) \cdot Q_H$$

или в относительных величинах:

$$\frac{b}{K_p} = \frac{b_p}{K_{PM}} = b_H = \frac{b_1}{K_{M1}} = \frac{1}{K_{M2}} \quad (9)$$

$$\left( \begin{array}{l} K_p = b \cdot K_{M2}; K_{M1} = b_1 \cdot K_{M2}; \\ K_{PM} = b_p \cdot K_{M2}; 1 = b_H \cdot K_{M2} \end{array} \right)$$

С учетом взаимозависимости коэффициентов (6) и соотношения (9):

$$K_{PM} = \left( \frac{b_1}{1+b_1} \right) \cdot K_{M2}; b_p = \left( \frac{b_1}{1+b_1} \right). \quad (10)$$

С учетом графика скорости (см. рис. 2):

$$t_2 = (S_x / V_p) + (S_{PM} / V_{PM}) + (S_{M1} / V_{M1}) + (S_{M2} / V_{M2}) + (S_H / V_H).$$

В относительных величинах с учетом соотношений (2) и (5):

$$t_2 = (S_H / V_H) (ak_p + a_p k_{PM} + c + d_1 k_{M1} + d_2 k_{M2}) \quad (11)$$

При этом

$$\begin{aligned} (d_1 + d_2) &= (1 - a - a_p - c); \\ d_1 / d_2 &= k, d_1 = [k / (k + 1)] \cdot (1 - a - a_p - c); \\ d_2 &= [1 / (k + 1)] \cdot (1 - a - a_p - c), \end{aligned}$$

тогда, при  $k_{M1} = b_1 k_{M2}$  из (9):

$$d_1 k_{M1} + d_2 k_{M2} = m \cdot (1 - a - a_p - c) \cdot k_{M2}, \quad (12)$$

где  $m = (k \cdot b_1 + 1) / (k + 1)$ ; при  $k = 1$ ,  $m = (1 + b_1) / 2$ .

С учетом зависимостей (8) и (11) равенство  $t_1 = t_2$  преобразуется к виду:

$$a \cdot k_p + a_p \cdot k_{PM} + c + d_1 \cdot k_{M1} + d_2 \cdot k_{M2} = 1.$$

С учетом соотношений (9) и (12):

$$a \cdot b \cdot k_{M2} + a_p \cdot b_p \cdot k_{M2} + m \cdot (1 - a - a_p - c) \cdot k_{M2} = 1 - c.$$

Откуда:

$$K_{M2} = (1 - c) / [a \cdot b + a_p \cdot b_p + m \cdot (1 - a - a_p - c)], \quad (13)$$

$$k_{M1} = b_1 k_{M2}; k_{PM} = b_p k_{M2}; k_p = b k_{M2}.$$

Величину  $a_p$  определяют параметры принятого линейного графика  $P = f(S)$  (см. рис. 2) и величина  $b_p$  (10), а именно:

$$a_p = (1 - a) \cdot (b_p - b_0) / (1 - b_0). \quad (14)$$

Величину  $c$  при известных значениях  $a$  и  $a_p$  определяем из равенства давления насоса, соответствующего двум условиям: первое – точка  $b_H$  ( $p_H$ ) находится на линии графика  $P = f(S)$  (см. рис. 2), линия проходит через точки графика  $P_0(b_0)$  и  $P_{max}(1)$ ; второе – давление  $P_H$  ( $b_H$ ) определяет мультипликаторная ступень с коэффициентом  $K_{M2}$  (13), то есть  $b_H = 1 / K_{M2}$ . В итоге это равенство:

$$b_0 + [(1 - b_0) / (1 - a)] (a_p + c) = [a_p \cdot b_p + a \cdot b + m \cdot (1 - a - a_p - c)] / (1 - c).$$

Данное равенство преобразуется к виду  $[c^2 - 2A c + B = 0]$

с решением  $[c = A - \sqrt{A^2 - B}]$ , где  $A$  и  $B$  – обобщенные параметры:

$$A = \{[(1 - a) (m - b_0)] / [2(1 - b_0)] + (1 - a_p) / 2\};$$

$$B = [(1 - a) / (1 - b_0)] \cdot$$

$$[a \cdot b + a_p \cdot b_p + m (1 - a - a_p) - b_0] - a_p,$$

при этом:  $b_p$  определяем по (10);  $m$  по (12);  $a_p$  по (14).

Для осуществления анализа с использованием полученных зависимостей необходимы исходные величины:  $a$ ,  $b$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ .

Величины  $a$ ,  $b$  и  $b_0$  определяют технологический процесс и непосредственно принятый для анализа линейный график силовой нагрузки в относительных величинах давления и перемещения (см. рис. 2). В соответствии с этим графиком и принимаемым условием ( $d_1 = d_2 = d$ ) величину  $b_1$  определяет величина  $b_H$  как

$$b_1 = (1 + b_H) / 2 \quad (15)$$

В свою очередь минимальное значение величины  $b_H$  определяет величина площади рассматриваемого графика ( $F_r$ ). А именно:

$$b_H = F_r = [(1 + b_0) \cdot (1 - a) / 2] + a \cdot b \quad (16)$$

или с учетом (15) и (16)

$$b_1 = [2 \cdot (1 + a \cdot b) + (1 + b_0) \cdot (1 - a)] / 4$$

В табл. 1 приведены результаты расчета параметров привода с использованием полученных зависимостей.

При принятых исходных данных снижение давления и мощности насосов (величина  $n$ ) составляет 34–40 % (возрастает при увеличении холостого хода и незначительно снижается при повышении давления холостого хода).

Приведенная в табл. 1 величина  $b_H = F_r$  также определяет номинальное давление и мощность насосов рассматриваемого привода. Поскольку эта величина рассчитана по площади графика силовой нагрузки в относительных величинах, она определяет идеальный вариант полного использования установочной мощности насосов. В этом случае

**Таблица 1.** Расчетные параметры пятиступенчатого привода  
**Table 1.** Calculated parameters of the five stage drive

Исходные данные при $b_0 = 0,3$		Расчетные параметры									
$b$	$a$	$b_H = F_T$	$b_1$	$b_p$	$a_p$	$C$	$K_{M2}$	$K_{M1}$	$K_{PM}$	$K_p$	$n$
0,1	0,1	0,595	0,798	0,444	0,185	0,288	1,56	1,24	0,69	0,156	0,64
0,1	0,2	0,54	0,77	0,435	0,154	0,194	1,66	1,28	0,72	0,332	0,6
0,2	0,1	0,605	0,803	0,445	0,186	0,303	1,5	1,2	0,68	0,15	0,66
0,2	0,2	0,56	0,78	0,438	0,158	0,212	1,6	1,25	0,7	0,32	0,62

снижение мощности составляет 39,5–46%. Небольшая разность мощностей насосов рассматриваемого привода (величина  $n$ ) и идеального (величина  $b_H$ ) (5,5–6%) указывает на эффективность разработанного привода.

### Оценка эффективности четырехступенчатого привода

Силовая нагрузка и условия сравнительного анализа данного привода соответствуют требованиям, принятым для пятиступенчатого привода по (7).

В рассмотренных примерах расчета параметров пятиступенчатого привода (см. табл. 1) расчетные величины  $b_p$  ( $b_p = 0,435–0,445$ ), определяющие величину давления редукторной ступени, обеспечиваемой блочным редуктором-мультипликатором, значительно превышают реальные значения относительно давления холостого хода  $b$  ( $b = 0,1–0,2$ ). С учетом этого зону редукторной ступени, исполняемую в данном случае редуктором-мультипликатором при холостом ходе, распространяем на начальную часть рабочего хода (рис. 3). Далее последовательно исполняются насосная и две мультипликаторные ступени. Для рассматриваемого привода с учетом (2), (5) и (7):

$$N_2 = \frac{P_{PM} \cdot Q_H}{K_{PM}} = Q_H \cdot P_H = \frac{P_{M1} \cdot Q_H}{K_{M1}} = \frac{P_{M2} \cdot Q_H}{K_{M2}}$$

или в относительных величинах:

$$\frac{b_p}{K_{PM}} = b_H = \frac{b_1}{K_{M1}} = \frac{1}{K_{M2}}, \quad (17)$$

( $K_{PM} = b_p \cdot K_{M2}$ ;  $K_{M1} = b_1$ ;  $K_{M2} = 1 = b_H \cdot K_{H2}$ ).

На основании графика скорости (рис.3):

$$t_2 = \frac{S_P}{V_P} + \frac{S_H}{V_P} + \frac{S_{M1}}{V_{M1}} + \frac{S_{M2}}{V_{M2}}$$

или в относительных величинах, с учетом (2) и (5):

$$t_2 = \frac{S_H}{V_H} (a_p \cdot K_{PM} + c + d_1 \cdot K_{M1} + d_2 \cdot K_{M2}). \quad (18)$$

При этом  $(d_1 + d_2) = (1 - a_p - c)$  и подобно (12):

$$d_1 \cdot K_{M1} + d_2 \cdot K_{M2} = m \cdot (1 - a_p - c) \cdot K_{M2}, \quad (19)$$

где  $m = (1 + b_1) / 2$ .

С учетом (8) и (18)  $t_1 = t_2$  преобразуется к виду:

$$a_p \cdot K_{PM} + c + d_1 \cdot K_{M1} + d_2 \cdot K_{M2} = 1.$$

С учетом соотношений (17) и (19)

$$a_p \cdot b_p \cdot K_{M2} + m \cdot (1 - a_p - c) \cdot K_{M2} = 1 - c,$$

откуда:

$$K_{M2} = \frac{1 - c}{a_p \cdot b_p + m \cdot (1 - a_p - c)}. \quad (20)$$

Величину  $a_p$  определяют параметры принятого линейного графика  $P = f(S)$  (рис. 3) и величин  $b_p$  (10), а именно:

$$a_p = \frac{b_p - b_0}{1 - b_0} (1 - a) + a. \quad (21)$$

Величину  $c$  при известной величине  $a_p$  определяем из равенства давления насоса, соответствующего двум условиям:

– точка  $b_H(P_H)$  находится на линии графика  $P = f(S)$  (рис. 3);

– значение  $P_H(b_H)$  определяет мультипликаторная ступень с коэффициентом  $K_{M2}$  (20), т. е.  $b_H = 1/K_{M2}$ .

В итоге это равенство принимает вид:

$$\frac{(1 - b_0)}{(1 - a)} \cdot c + b_p = \frac{a_p \cdot b_p + m \cdot (1 - a_p - c)}{(1 - c)}.$$

Данное равенство преобразуется к уравнению вида  $[c^2 - 2A + B = 0]$  с решением  $c = A - \sqrt{A^2 - B}$ , где  $A$  и  $B$  – обобщенные параметры:

$$A = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{(1 - a)}{(1 - b_0)} \cdot (m - b_p) \right];$$

$$B = \frac{(1 - a) \cdot (1 - a_p) \cdot (m - b_p)}{(1 - b_0)},$$

при этом  $m$  определяем по (12);  $b_p$  – по (10);  $a_p$  – по (21).

Необходимые исходные величины определяем аналогично пятиступенчатому приводе.

Величины  $a$ ,  $b$  и  $b_0$  определяют технологический процесс и непосредственно принятый для анализа линейный график силовой нагрузки

Таблица 2. Расчетные параметры четырехступенчатого привода  
Table 2. Calculated parameters of the four stage drive

Исходные данные при $b_0 = 0,3$		Расчетные параметры								
$b$	$a$	$b_H = F_T$	$b_1$	$b_D$	$a_D$	$C$	$K_{M2}$	$K_{M1}$	$K_{DM}$	$n$
0,1	0,1	0,595	0,798	0,444	0,285	0,344	1,42	1,13	0,63	0,7
0,1	0,2	0,54	0,77	0,435	0,354	0,266	1,5	1,16	0,66	0,66
0,2	0,1	0,605	0,803	0,445	0,286	0,334	1,42	1,14	0,632	0,7
0,2	0,2	0,56	0,78	0,438	0,358	0,265	1,49	1,16	0,65	0,67

ки в относительных величинах (рис. 3). В соотношении с этим графиком и принятым условием ( $d_1 = d_2 = d$ ) величину  $b_1$  определяет величина  $b_H$  из (15), минимальное значение которой определяет, в свою очередь, величина площади рассматриваемого графика ( $F_T$ ) (16).

В табл. 2. приведены результаты расчета параметров четырехступенчатого привода с использованием полученных зависимостей.

При принятых исходных данных снижение

давления и мощности насосов (величина  $n$ ) составляет (30–34 %) (возрастает при увеличении холостого хода). Это на (4–6 %) меньше по сравнению с пятиступенчатым приводом, что логически оправдано.

### Заключение

1. Разработана схема редукторно-мультипликаторного привода для обеспечения снижения рабочего давления и установочной мощ-

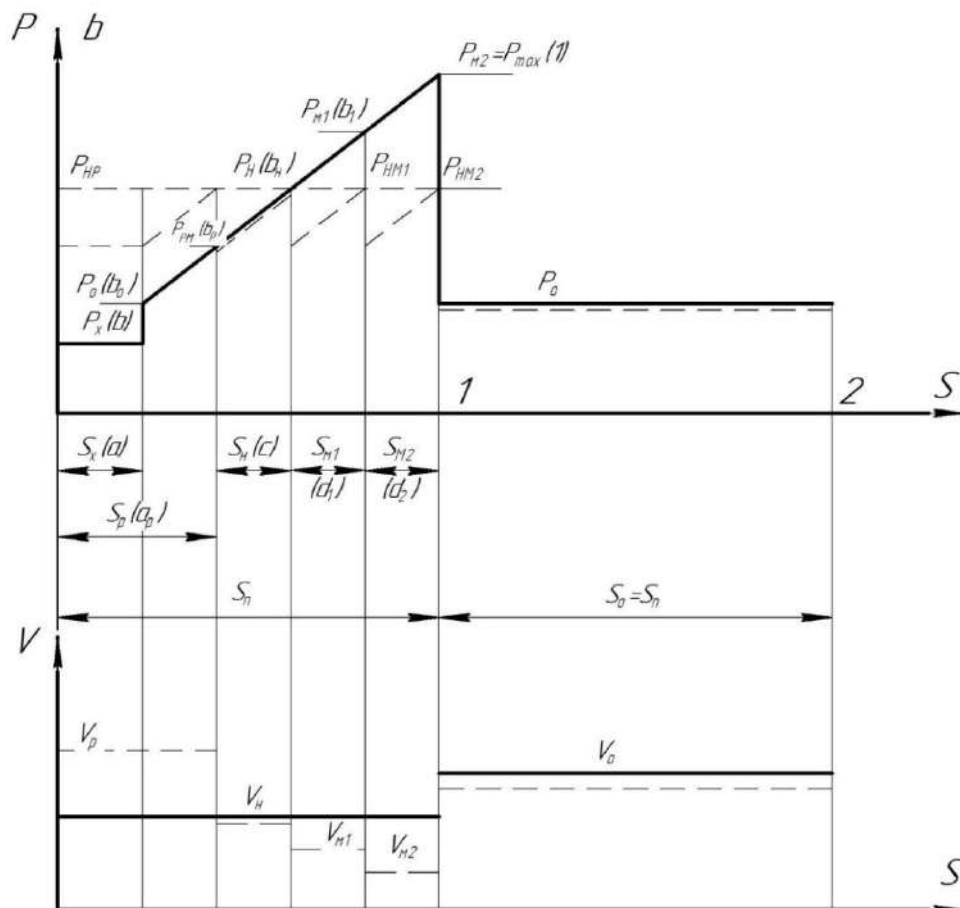


Рис. 3. Графики давления  $P = f(S)$  и скорости  $V = f(S)$   
(сплошная линия для простого привода, пунктирная линия для редукторно-мультипликаторного привода (четырёхступенчатого))

Fig. 3. Graphs of pressure  $P = f(S)$  and velocity  $V = f(S)$   
(solid line is for the simple drive, dotted line is for gear-multiplier (four stage) drive)

ности насосов технологических машин.

2. Проведена оценка эффективности работы многоступенчатых гидроприводов.

3. Установлена и представлена графически зависимость давления в силовых цилиндрах насосов от перемещения плунжеров силового блока.

4. Анализ работы пятиступенчатого привода показал снижение давления и мощности насосов на 34 % и более по сравнению с простым насосным приводом. При сравнимых исходных данных четырехступенчатый привод обеспечивает снижение этих параметров на 4–6 % меньше.

### Список литературы

1. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. М. : Машиностроение, 1982. 423 с.
2. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро – и пневмоприводов. М. : Машиностроение, 1991. 384 с.
3. Гидравлика, гидромашин и гидропривод / Т.В. Артемьева, Т.М. Лысенко, А.П. Румянцев и др. М. : Академия, 2005. 336 с.
4. Akers A., Gassman M., Smith R. Hydraulic Power System Analysis. New York: Taylor and Francis, 2006. 400 p. DOI: [org/10.1201/9781420014587](https://doi.org/10.1201/9781420014587).
5. Bhandari V.B. Design of Machine Elements. Third edition. 3rd ed. Tata McGraw-Hill Education India Pvt. Ltd, 2012. P. 768–796.
6. Vibration of Hydraulic Machinery (Mechanisms and Machine Science. Vol. 11) / Yulin Wu, Shengcai Li, Shulong Liu et al., Springer, 2015. 500 p.
7. Бочаров Ю. А., Прокофьев В. Н. Гидропривод кузнечно-прессовых машин : М. : Высш. шк., 1969. 247 с.
8. Singal R.K., Singal M., Singal R. Hydraulic Machines: Fluid Machinery. International Publishing House, 2009. 328 p.
9. Добринский Н.С. Гидравлический привод прессов. М. : Машиностроение, 1975. 222 с.
10. Singh Sadhu. Fluid Machinery: Hydraulic Machines. Khanna Book Publishing Co., 2014. 478 p.
11. Modi P.N., Seth S.M. Hydraulics and Fluid Mechanics Including Hydraulics Machines. Rajsons Publications Pvt. Ltd., 2015. 1406 p.
12. Rajput R.K. Fluid Mechdnics and Hydraulic Machines. New Delhi, 2008. 1558 p.
13. Jathar Avinash, Kushwaha Avinash, Singh Utkarsh, Kumar Subhash. Fabrication and Review of Hydraulic Heavy Sheet Metal Cutting machine // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR). 2016. Vol. 3. No. 4. P. 37 – 41.
14. Krantikumar K., Saikiran K.V.S.S., Sathish Jakkaju. Pneumatic Sheet Metal Cutting Machine // International Journal and Magazine of Engineering, Technology, Management and Research. 2016. Vol. 3. No. 3. P. 501 – 509.
15. Sermaraj M. Design and Fabrication of Pedal Operator Reciprocating Water Pump // Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2013. Vol. 2. No. 1. P. 64 – 83.
16. Нехай С.М. Проектирование гидроприводов прессов. М. : Машгиз, 1963. 156 с.
17. Никоноров Л.В. Ножницы с редукторно-мультипликаторным приводом силового блока для резки листового проката наклонным ножом // Вестник машиностроения. 2008. № 4. С. 42-45.
18. Разработка и исследование гидравлического редукторно-мультипликаторного привода металлургических машин / А.П. Потапенков, С.С. Пилипенко, Ю.Г. Серебренников и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2009. № 8. С. 54 – 59.
19. Салман М.И. Сравнение динамических характеристик гидравлических приводов при двух способах управления золотниковым распределителем // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 7. С. 43–48.
20. Пилипенко С.С., Байгузин М.Р., Потапенков А.П. Разработка и исследование гидравлического редукторно-мультипликаторного привода с блочными дозаторами // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 10. С. 720 – 725. DOI: [10.17073/0368-0797-2016-10-720-726](https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-10-720-726).
21. Пат. 2663028 Рос. Федерация. Гидравлическое установочное устройство / С.С. Пилипенко, Д.В. Дубров, А.П. Потапенков [и др.]. № 2016142256; заявл. 26.10.2016 ; опубл. 01.08.2018, Бюл. №22. 13 с.
22. Пат. 2667944 Рос. Федерация. Гидравлическое установочное устройство прокатного стана / С.С. Пилипенко, А.П. Потапенков, М.А. Перепелкин [и др.]. № 2016122719; заявл. 08.06.2016 ; опубл. 25.09.2018, Бюл. №27. 12 с.
23. Оценка возможности применения редукторного привода в трансмиссии геохода / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, В.И. Нестеров и др. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 5 (93). С. 18-21.
24. Чехутская Н.Г. Применение манипуляторов с гидравлическим приводом в машинах различного технологического назначения // Агротехника и энергообеспечение. 2014. № 1 (1). С. 61–64.

### References

1. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B., Baibakov O.V., Kirillovskii Yu.L. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic actuators]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1982. 423 p.
2. Navrotskii K.L. Teoriya i proektirovanie gidro– i pnevmoprivodov [Theory and design of hydraulic and pneumatic actuators]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1991. 384 p.
3. Artem'eva T.V., Lysenko T.M., Rumyantseva A.N., Stesin S.P. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivod [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic actuator]. Moscow: Akademiya Publ., 2005. 336 p.
4. Akers A., Gassman M., Smith R. Hydraulic Power System Analysis. New York: Taylor and Francis, 2006. 400 p. DOI: [org/10.1201/9781420014587](https://doi.org/10.1201/9781420014587).
5. Bhandari V.B. Design of Machine Elements. Third edition. 3rd ed. Tata McGraw-Hill Education India Pvt. Ltd, 2012. Pp. 768–796.



6. Vibration of Hydraulic Machinery (Mechanisms and Machine Science. Vol. 11) / Yulin Wu, Shengcai Li, Shulong Liu et al., Springer, 2015. 500 p.
7. Bocharov Yu.A., Prokof'ev V.N. Gidroprivod kuznechno-pressovykh mashin [Hydraulic actuator of forging and pressing machines]. Moscow: Vysshaya shkola, 1969. 247 p.
8. Singal R.K., Singal M., Singal R. Hydraulic Machines: Fluid Machinery. International Publishing House, 2009. 328 p.
9. Dobrinskii N.S. Gidravlicheskiy privod pressov [Hydraulic actuator of presses]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975. 222 p.
10. Singh Sadhu. Fluid Machinery: Hydraulic Machines. Khanna Book Publishing Co., 2014. 478 p.
11. Modi P.N., Seth S.M. Hydraulics and Fluid Mechanics Including Hydraulics Machines. Rajsons Publications Pvt. Ltd., 2015. 1406 p.
12. Rajput R.K. Fluid Mechanics and Hydraulic Machines. New Delhi, 2008. 1558 p.
13. Jathar Avinash, Kushwaha Avinash, Singh Utkarsh, Kumar Subhash. Fabrication and Review of Hydraulic Heavy Sheet Metal Cutting machine // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), 2016, vol. 3, no. 4, pp. 37 – 41.
14. Krantikumar K., Saikiran K.V.S.S., Sathish Jakkoju. Pneumatic Sheet Metal Cutting Machine // International Journal and Magazine of Engineering, Technology, Management and Research, 2016, vol. 3, no. 3, pp. 501 – 509.
15. Sermaraj M. Design and Fabrication of Pedal Operator Reciprocating Water Pump // Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 64 – 83.
16. Nekhai S.M. Proektirovanie gidroprivodov pressov [Design of hydraulic actuators of presses]. Moscow: Mashgiz Publ., 1963. 156 p.
17. Nikonov L.V. Nozhnitsy s reduktorno-mul'tiplikatornym privodom silovogo bloka dlya rezki listovogo prokata naklonnym nozhom [Scissors with gear-multiplier actuator of the power unit for cutting sheet metal with an inclined knife]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of mechanical engineering], 2008, no. 4, pp. 42–45.
18. Potapenkov A.P., Pilipenko S.S., Serebrennikov Yu.G., Stepanov S.M., Sosnovskaya L.V. Razrabotka i issledovanie gidravlichesкого reduktorno-mul'tiplikatornogo privoda metallurgicheskikh mashin [Development and research of hydraulic gear-multiplier actuator of metallurgical machines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya* [Bulletins of higher educational organizations. Ferrous metallurgy], 2009, no. 8, pp. 54 – 59.
19. Salman M.I. Savnienie dinamicheskikh kharakteristik gidravlicheskh privodov pri dvukh sposobakh upravleniya zolotnikovym raspredelitelem [Comparison of dynamic characteristics of hydraulic actuators with two methods of control of the spool distributor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Bulletins of High educational organizations. Mechanical engineering], 2013, no. 7, pp. 43–48.
20. Pilipenko S.S., Baiguzin M.R., Potapenkov A.P. Razrabotka i issledovanie gidravlichesкого reduktorno-mul'tiplikatornogo privoda s blochnymi dozatorami [Development and research of a hydraulic gear-multiplier drive with block dispensers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya* [Bulletins of higher educational organizations. Ferrous metallurgy], 2016, vol. 59, no. 10, pp. 720 – 725. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-10-720-726.
21. Pilipenko S.S., Dubrov D.V., Potapenkov A.P., Perepelkin M.A., Kisel' A.A., Maslova A.T. Patent RU 2663028 C2, 01.08.2018.
22. Pilipenko S.S., Potapenkov A.P., Perepelkin M.A., Kisel' A.A., Pilipenko A.S. Patent RU 2667944 C2, 25.09.2018.
23. Aksenov V.V., Khoreshok A.A., Nesterov V.I., Blashchuk M.Yu. Otsenka vozmozhnosti primeneniya reduktornogo privoda v transmssii geokhoda [Evaluation of the possibility of using a gear drive in the geohod transmission]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2012, no. 5(93), pp. 18–21.
24. Chekhutskaya N.G. Primenenie manipulyatorov s gidravlicheskim privodom v mashinakh razlichnogo tekhnologicheskogo naznacheniya [The use of manipulators with hydraulic drive in machines of various technological purposes]. *Agrotekhnika i energoobespechenie* [Agrotechnics and energy supply], 2014, no. 1 (1), pp. 61–64.

### Информация об авторах

**Потапенков Александр Петрович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологических машин и оборудования, Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск; e-mail: pilipenko@norvuz.ru.

**Пилипенко Сергей Степанович**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой технологических машин и оборудования, Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск; e-mail: pilipenko@norvuz.ru.

### Information about the authors

**Alexander P. Potapenkov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Technological machines and equipment, Polar State University named after N.M. Fedorovskii, Noril'sk; e-mail: pilipenko@norvuz.ru.

**Sergei S. Pilipenko**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Technological machines and equipment, Polar State University named after N.M. Fedorovskii, Noril'sk; e-mail: pilipenko@norvuz.ru.

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ТРАНСПОРТ**

**TRANSPORT**

## Комплексное решение постановки плана железнодорожного пути в проектное положение

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

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

✉lagerev.sergey@gmail.com

### Резюме

В связи со стремительным ростом скоростей движения поездов существует необходимость в новых подходах к ремонту и содержанию железнодорожного пути в плане и профиле, что делает данную тему актуальной. В статье рассматриваются вопросы оптимизации съемки плана железнодорожного пути. Анализируется точность съемочных работ координатных и хордо-стреловых способов. После анализа выполнено моделирование в программном комплексе «Универсальный механизм». За основу модели взят реальный участок Иркутск-Сортировочной дистанции Восточно-Сибирской железной дороги, расположенный на 5 186–5 189 км. Главной целью моделирования являлось исследование влияния неровности пути в плане на поперечные силы крипа. При этом неровность в плане задана в размере величины неточности рассматриваемых способов съемки. В результате моделирования установлено, как неровность пути в плане влияет на поперечные силы, а также наглядно доказано, что для проектирования, содержания и ремонта железнодорожного пути необходимо применять комплексные или комбинированные способы выправки. Комбинированная съемка подразумевает синергию двух способов. Первый способ необходим для пространственного позиционирования пути, второй – для получения его максимальной плавности. Таким образом, соединение координатных и хордо-стреловых способов съемки может дать положительный результат в повышении качества содержания железнодорожного пути в плане. В работе даны рекомендации по комплексному решению постановки плана пути в проектное положение. Для этого целесообразно развивать и использовать как современные способы съемки с применением референчных станций, так и давно применяющиеся способы, основанные на измерении кривизны пути.

### Ключевые слова

съемка железнодорожного плана пути, координатная съемка железнодорожного пути, референчные станции, программный комплекс «Универсальный механизм», точность измерения плана железнодорожного пути, проектное положение плана железнодорожного пути

### Для цитирования

Комплексное решение постановки плана железнодорожного пути в проектное положение / С.Ю. Лагерев, И.Г. Карпов, Д.Н. Насников, Т.Н. Асалханова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 58–68. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).58-68.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 28.10.2021 г.; поступила после рецензирования: 19.12.2021 г.; принята к публикации: 11.05.2022 г.

## A comprehensive solution for setting the railway track plan in the design position

S.Yu. Lagerev✉, I.G. Karpov, D.N. Nasnikov, T.N. Asalkhanova

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉lagerev.sergey@gmail.com

### Abstract

Due to the rapid growth of the train traffic speed there is a need in new approach to the repair and maintenance of a railway track both in plan and profile view making the subject topical. The paper considers the issues of the railway track plan survey. The accuracy of coordinate and boom surveying methods is analyzed. Following the analyses the modeling is performed in the "Universal mechanism" software package. The model is based on the existing section of the Irkutsk-Sortirovochnaya distance of East Siberian railroad situated at 5186 – 5189 km. The main purpose of the modeling was to consider the influence of the track plan unevenness on the creep shear forces. Herein the plan unevenness is given in the error value of the considered shooting methods. During the modeling it was found out how the track plan unevenness affects the shear forces, and demonstrated that while designing, maintaining and repairing the railway track it is necessary to use comprehensive or combined methods of straightening. The combined survey implies the synergy of the two methods. The first method is needed for the spatial positioning of the track while the second one – to achieve its maximum smoothness. Thus the combination of coordinate and boom methods can produce a positive result in increasing the quality of railway track maintenance in plan. In the article the recommendations are given for

comprehensive solution of setting the track into the designed position. For this, it is appropriate to develop and apply both modern methods using reference stations and the long-standing ones based on measuring the track's curvature.

### Keywords

survey of the railway track plan, coordinate survey of the railway track, reference stations, software package «Universal mechanism», measurement accuracy of the railway track plan, the design position of the railway track plan

### For citation

Lagerev S.Yu., Karpov I.G., Nasnikov D.N., Asalkhanova T.N. Kompleksnoe reshenie postanovki plana zheleznodorozhnogo puti v proektnoe polozhenie [A comprehensive solution for setting the railway track plan in the design position]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 58–68.–DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).58-68.

### Article info

Received: October 28, 2021; revised: December 19, 2021; accepted: May 11, 2022.

### Введение

Одной из сложных задач при ремонте и содержании железнодорожного пути по-прежнему является его выправка. Традиционные подходы к выправке пути не дают возможности проектного его содержания. Основной проблемой является отсутствие взаимодействия между проектными организациями и путевыми работниками (рис. 1). При этом зачастую геодезисты и проектировщики не вникают в технологию и возможности путевых работ, что также оказывает негативное влияние на качество ремонтов.



**Рис. 1.** Взаимодействие организаций при ремонте путей

**Fig. 1.** The interaction of organizations in the repair of tracks

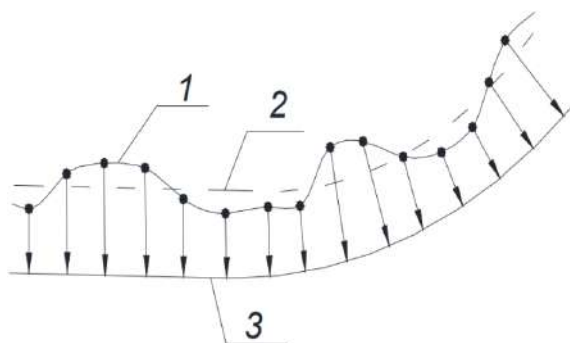
Так, проектно-исследовательские работы по содержанию плана железнодорожной линии уже давно выполняются в координатах, а непосредственно сама постановка производится с привязкой к соседнему пути (рис. 2).



**Рис. 2.** Укладка пути с применением междупутного шаблона

**Fig. 2.** Laying a track using an inter-track template

Таким образом, после проектно-исследовательских работ выправка пути выполняется без их участия (без применения проектной документации). При этом основной целью выправки в таком случае является сохранение плавности движения подвижного состава. Такой процесс выправки пути, когда происходит общее смещение срединного положения из положения 1 в положение 2 рельсовой нити, называют сглаживанием (рис. 3). Если такое смещение происходит в горизонтальной плоскости, то его называют сдвигом, а в вертикальной плоскости – подъемкой (движение вверх) или осаживанием (движение вниз, например, при уравнивании балластного слоя динамическим стабилизатором пути). При смещении натурального положения рельсовой нити из положения 1 в 3 достигается постановка пути в проектное положение [1].



**Рис. 3.** Выправка пути методом сглаживания: (1 – натурное положение оси пути; 2 – ось отрихтованного пути по способу сглаживания; 3 – проектное положение оси пути)

**Fig. 3.** Smoothing the track by smoothing: (1 – the full-scale position of the axis of the track; 2 – the track axis straightened by smoothing methods; 3 – the design position of the track axis)

При таком подходе частично обеспечивается плавность движения поездов, но не выполняется главная задача – постановка пути в проектное положение, что, в конечном итоге, приводит к появлению таких негативных последствий:

- негабарит приближения строений;
- появление s-образных кривых при подходе к мостам и стрелочным переводам;
- положение кривых с неоптимальными ее параметрами (длины переходных и круговых кривых и их положения);
- другие последствия.

Учитывая стремительное увеличение скоростей движения поездов, необходим новый подход к ремонту и содержанию железнодорожного пути в плане и профиле. Очень важно более тщательно оценивать показатели плавности движения и комфортности поездки, которые часто вообще не анализируются, что отрицательно сказывается на содержании железнодорожного пути [2].

Наиболее современным и правильным решением будет переход к координатным системам. При этом в геодезических и проектных работах они уже давно применяются. Однако, когда дело доходит до выполнения непосредственно самих ремонтов, то из-за невозможности работы машин в координатных системах укладка и рихтовка пути производятся не по проекту. Следовательно, ремонты выполняются с постановкой пути в плане по методу сглаживания или по локальной съемке с предвари-

тельной измерительной поездкой, как уже было описано ранее. Из-за отсутствия комплексной технологии, позволяющей работать всем организациям в одной современной системе, происходит преждевременное расстройство и «зарихтованность» пути. Система обеспечения контроля качества работ при этом отходит на второй план [3].

### **Оценка влияния неровности пути на поперечные силы с использованием моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм»**

Результаты эксперимента, описанные в [4], показывают, что расхождение углов поворота в конце участка при съемках плана пути стреловыми способами составило  $0^{\circ}59'1,51''$ , что свидетельствует о наличии большой погрешности по длине пути. Однако графики кривизны (рис. 4) характеризуют, небольшой разброс стрел и высокую точность их определения между соседними точками.

Расхождение углов поворота в конце участка при разных координатных съемках составляет  $0^{\circ}5'1''$ . Это указывает на хорошую точность выправки по длине пути. Однако резкое изменение величин кривизны (рис. 5) свидетельствует о плохой точности измерений между соседними точками, что зачастую оказывается на уровне тех рихтовок, которые получаются в расчетах.

Таким образом, точность стрелового способа на 30–50 мм выше, чем координатного. Однако преимущество точности пространственного позиционирования оси пути остается за координатным способом.

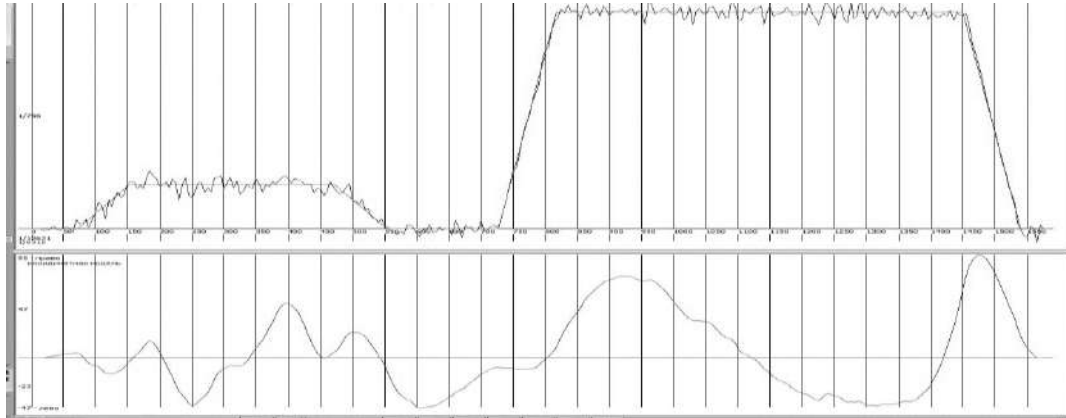
Для более глубокого анализа произведем моделирование части рассматриваемого участка в программном комплексе «Универсальный механизм». Характеристики рассматриваемого участка представлены на рис. 6.

За основу модели взят реальный участок Иркутск-Сортировочной дистанции Восточно-Сибирской железной дороги, расположенный на 5 186–5 189 км, который рассматривался в [4]. Основной элемент плана – это кривая: длины переходных кривых – 90 м; круговая кривая – 817,9 м; радиус кривой – 400 м; возвышение наружного рельса – 105 мм. Верхнее строение пути состоит из рельсов Р65, железобетонных шпал с промежуточными скреплениями типа ЖБР-65Ш. В виде модели поезда принят состав с тремя четырех-

осными вагонами. Скорость движения 90 км/ч (25 м/с), вес одного вагона 70 т.

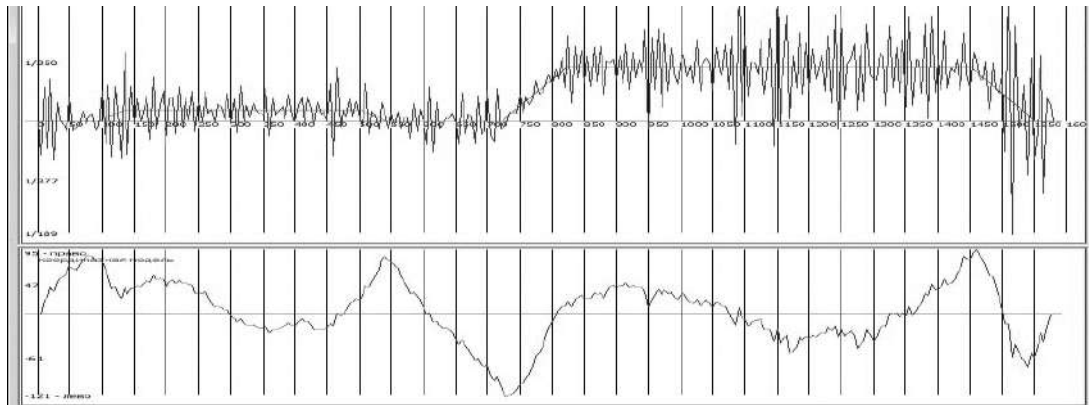
Основной целью моделирования является исследование влияния неровности пути в плане на поперечные силы крива. При этом величина неровности соответствует расхождению точности съемки между стреловым и координатным способами. Данный анализ необходим для до-

полнительного изучения возможности содержания и проектирования рельсовой колеи в координатных системах. При этом нужно учитывать, что в модели принята погрешность, возникающая во время измерительных работ. Съемка выполнялась в статическом режиме с увязкой полученных данных по всем правилам геодезических вычислений. Если сравнивать со



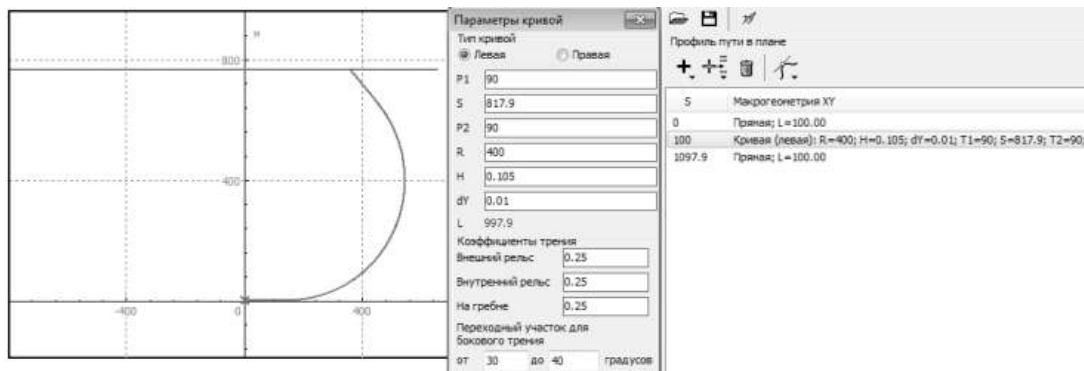
**Рис. 4.** Расчет выправки пути с применением данных, полученных модифицированным стреловым способом

**Fig. 4.** Calculation of the track straightening using data obtained by a modified boom method



**Рис. 5.** Расчет выправки пути с применением GPS-данных

**Fig. 5.** Calculation of the track straightening using GPS data



**Рис. 6.** Характеристики моделируемого участка в программном комплексе «Универсальный механизм»

**Fig. 6.** Characteristics of the simulated area in the «Universal Mechanism» software package

съемкой пути, выполняемой современными путеизмерительными тележками или выправочно-подбивочными машинами, работающими при поддержке глобальных навигационных спутниковых систем (Global Navigation Satellite System, GNSS), то точность будет гораздо ниже из-за производства работ в динамике. В таком случае дополнительная погрешность может возникать по следующим причинам: колебания измерительной базы; работа GPS/ГЛОНАСС приемника в динамическом режиме; высокое расположение антенны и др. В таком случае уход оси гироскопа – это один из важных факторов, который необходимо учитывать и контролировать [5–7]. Однако внедрение автоматизированного управления и глобальных навигационных технологий на выправочно-подбивочных машинах необходим на сетях ОАО «РЖД» [8].

При интегрированном моделировании без неровностей пути в плане, с заданными параметрами, максимальные поперечные силы крива составили 19 кН на внутренней рельсовой нити. Для построения графиков за основу принималась передняя колесная пара первого вагона (рис. 7).

Для интегрированного моделирования с отступлениями в плане принята локальная неровность пути в круговой кривой по типу  $h/2(1 - \cos x)$ , где  $h$  – величина неровности. Так как расхождение точности съемок кривой равно 0–50 мм, величина локальной неровности принята 25 мм (рис. 8).

Из графика зависимости поперечной силы крива от пройденного расстояния видно, что неровность пути в плане величиной 25 мм привела к увеличению силы примерно на 20 кН. Из-за того, что модель пути задана в виде неупругого элемента, величина поперечных сил сместилась после прохождения подвижным составом неровности. Средняя величина сдвига как раз показывает возможное увеличение поперечных сил при проходе подвижного состава по неровности пути в плане.

Применять описанную модель для точного прогнозирования движения подвижного состава нецелесообразно, так как на практике величина поперечных сил будет иметь другие значения. Они будут зависеть от множества дополнительных факторов, которые могут значительно повлиять на ситуацию. Однако данная модель наглядно и в очередной раз доказывает,

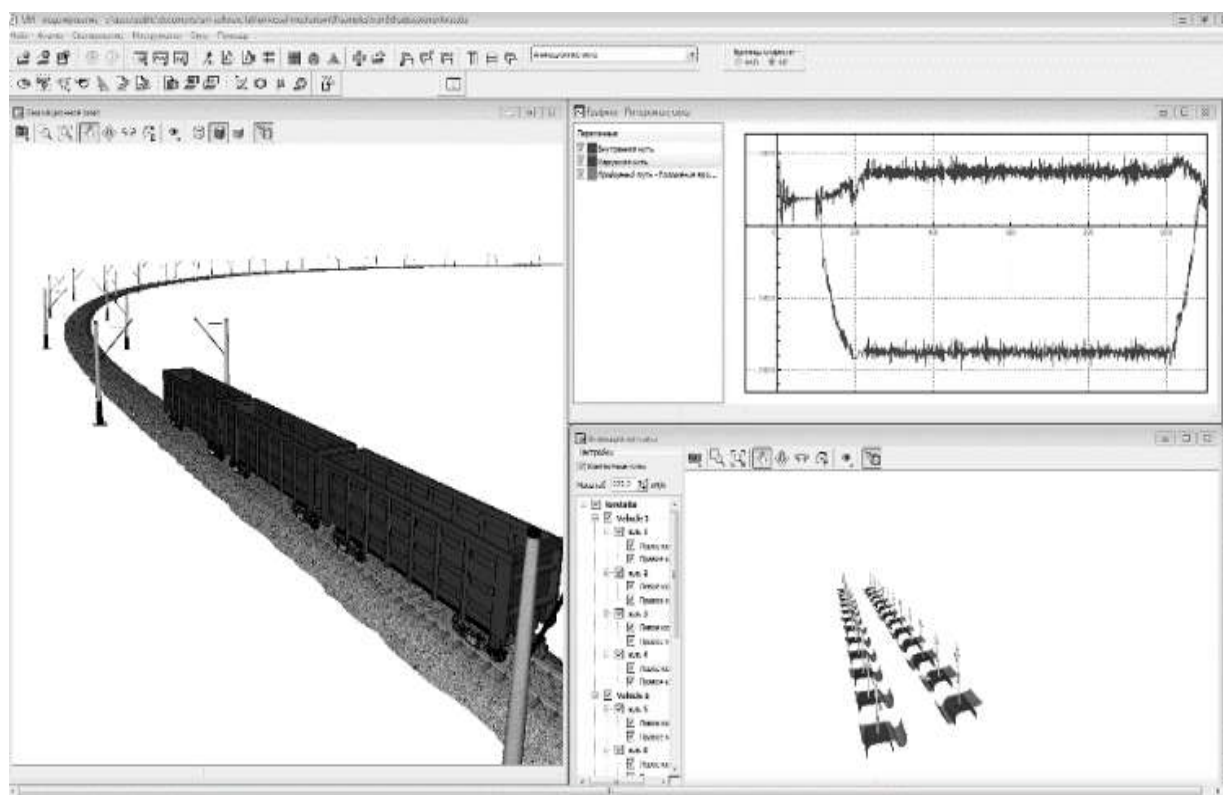


Рис. 7. Интегрированное моделирование при ровном плане пути в программном комплексе «Универсальный механизм»

Fig. 7. Integrated modeling for an even track plan in the «Universal Mechanism» software package

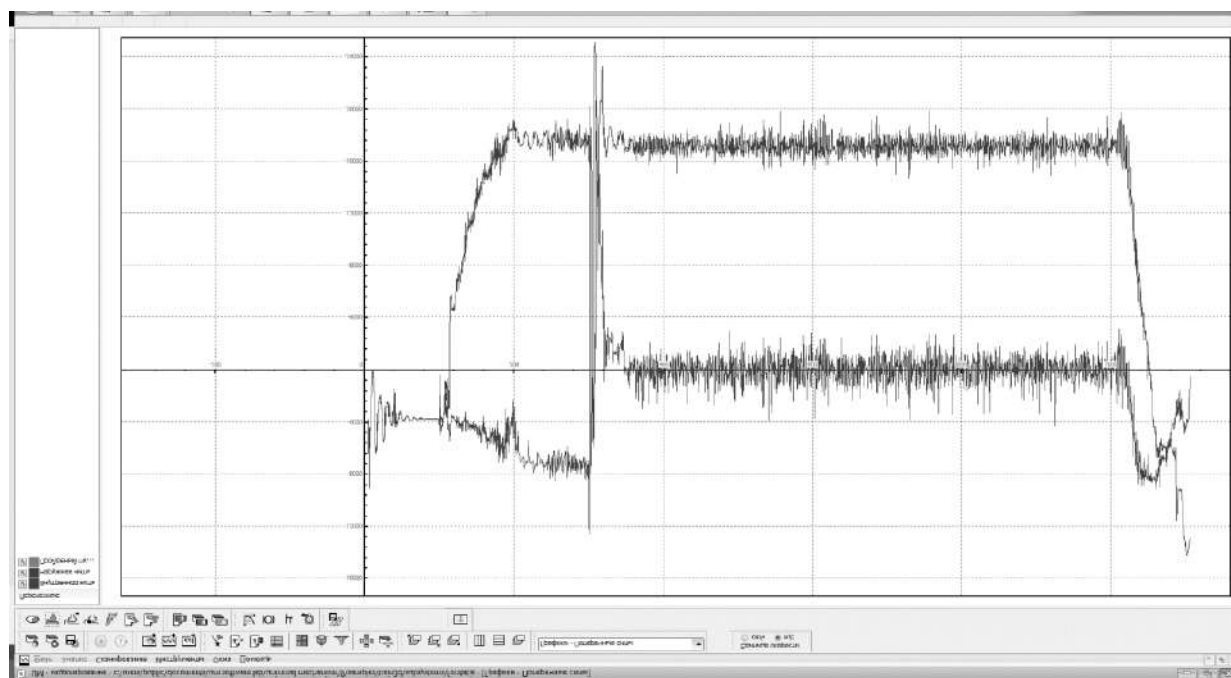


Рис. 8. Интегрированное моделирование при неровности в пути в плане в программном комплексе «Универсальный механизм»

Fig. 8. Integrated modeling under the plan track irregularities in the «Universal Mechanism» software package

что для проектирования, содержания и ремонта железнодорожного пути необходимо применять комплексные или комбинированные способы выправки. При этом особое внимание нужно уделять точности измерения и непосредственно самим работам по выправке пути.

### Способы съемки плана железнодорожного пути, основанные на измерении кривизны кривой

Эксперимент, проведенный в [4], доказывает, что исключать проверенные способы измерения пути, основанные на определении его кривизны, нельзя. Они позволяют оценивать равномерность изменения стрел изгиба. К ним относятся:

- способ стрел;
- модифицированный способ стрел;
- способ Гофера;
- способы, основанные на измерении угла поворота кривой.

Способ стрел применяется на кривых участках пути и состоит из разметочных и измерительных работ. При съемке кривой принято выполнять только один проход с измерением стрел изгиба, после чего выполняется расчет выправки с последующей рихтовкой. Следует отметить, что результаты такой съемки содер-

жат случайные и систематические ошибки, существенно влияющие на результаты всей работы. Также к недостаткам обычного способа стрел можно отнести большое расстояние между снимаемыми точками (как правило, 10 м). Уменьшение шага съемки до 5 м (хорда 10 м) вместо ожидаемого увеличения точности, приводит к возрастанию погрешности в десятки раз, поскольку абсолютное значение стрелы уменьшается, и относительная погрешность возрастает до 4 раз, количество точек возрастает вдвое (что при двойном суммировании стрел приводит также к возрастанию погрешности до 4 раз). Несмотря на все его недостатки применение этих способов в выправке пути, позволяет получить хорошую его плавность. Именно поэтому в современных выправочных машинах (ВПр, ВПО DUOMATIC и др.) присутствует сглаживающая система, основанная на измерении стрел изгиба.

Сглаживающая система – устройство, предназначенное для выправки (сглаживания) неровностей железнодорожного пути в плане или в продольном профиле, включающее подъемно-рихтовочное устройство (ПРУ) и одну или несколько измерительных хорд, служащих для измерения стрел изгиба пути в фиксированных точках измерения хорд, одна из этих точек счи-



тается одновременно и точкой воздействия ПРУ на путь. В процессе работы сглаживающая система ПРУ поддерживает стрелу изгиба пути в точке выправки в определенной зависимости от стрел, измеренных в других фиксированных точках.

Соотношение между стрелами изгиба пути, реализуемое системой в процессе выправки без учета специальной корректировки, изменяющей это соотношение в зависимости от проектных данных пути или его натурального состояния, называется основной формулой выправки. Корректировка установленного соотношения измеряемых контрольной системой стрел изгиба пути преследует цель предотвратить одно-стороннее смещение рельсовых нитей относительно требуемого после выправки положения.

### Координатные способы съемки

В настоящее время съемку железнодорожного пути осуществляют с помощью современного геодезического оборудования (нивелиров, теодолитов, тахеометров и спутниковых радионавигационных систем). Наиболее распространенным геодезическим оборудованием для измерения координат точек пути в плане являются тахеометры и спутниковые радионавигационные системы. Координатные измерения могут осуществляться способом линейной засечки; способом реперных створов; способом прямоугольных координат; способом полярных координат.

Как правило, получение координат точек пути основано на полярном способе, в основе которого заложен теодолитный или тахеометрический ход. При наличии GPS/ГЛОНАСС оборудования имеется возможность определять координаты точек пути. Одним из важных требований к съемке является открытая местность без каких-либо препятствий для наблюдения приемниками GPS/ГЛОНАСС спутников. Препятствиями служат: рядом стоящие здания, деревья, горы, элементы контактной сети и др. Наилучшие результаты получают только при использовании двухчастотных приемников в статическом режиме.

При установке GPS – приемников на путеизмерительные вагоны, тележки или выправочные машины производители оборудования и исследователи приводят следующие возможные погрешности (табл.). [9].

Точность GPS – приемников  
Accuracy of GPS-recievers

Режим измерений	Точность, мм
Бытовой	10 000
Геодезический одиночный	1 000
Геодезический дифференциальный	
Статика, быстрая статика	5+ $\Delta$
Кинематика	20+ $\Delta$
Движение (гироплатформа, специальная опорная сеть)	25+ $\Delta$
Движение	200+ $\Delta$

Дополнительное слагаемое  $\Delta$  зависит от расстояния между перемещающимся и стационарным приемниками и составляет 1–3 мм на один км.

Для получения более надежного сигнала приемники устанавливают повыше: либо на крыше вагона, либо на длинной штанге при применении путеизмерительных тележек. Такая установка приемника при движении подвижного состава по кривому участку пути с возвышением наружного рельса приводит к дополнительным погрешностям, возникающим по причине отклонения спутникового приемника от оси вагона (рис. 9). В этой связи на вагоны устанавливают гироскопы.

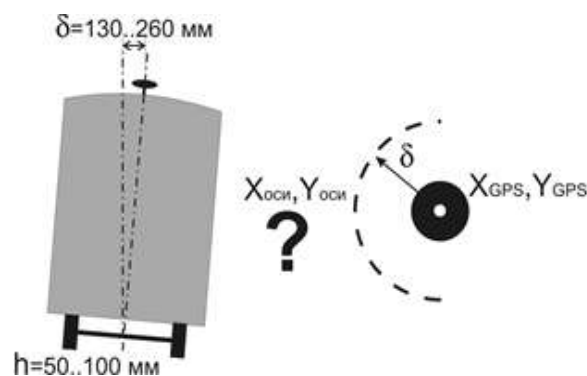


Рис. 9. Отклонение спутникового приемника от оси вагона

Fig. 9. Deviation of the satellite receiver from the axis of the wagon

Результаты проведенных экспериментов, показали, что использование гироскопического датчика с установкой вдоль пути постоянно действующих спутниковых приемников снижает точность съемки до 25 раз по сравнению с заявленными характеристиками производителей вагонов и тележек [10].

### Предложения по улучшению методики выправки с применением комплексного решения постановки плана железнодорожного пути

Если проанализировать преимущества и недостатки вышеописанных способов, можно прийти к выводу, что необходимо комплексное решение для улучшения качества выправки пути. Именно комбинированная съемка позволит решить данную задачу. Она подразумевает синергию двух способов. Первый способ необходим для пространственного позиционирования пути, второй – для получения его максимальной плавности.

Так как координатное представление железнодорожного пути позволяет укладывать и содержать путь в проектное положение и дает примерно одинаковую точность, независящую от длины рассматриваемого участка, то ключевые точки пути должны быть закоординированы. Под ключевыми точками понимаются: начало и конец кривых, мосты, стрелочные переводы и др. Определение координат этих точек можно получать разными способами и с помощью различного оборудования [11–15]. Однако целесообразнее и перспективнее создавать геодезическую сеть с применением классических реперных систем [16] или референциальных станций. Подобные системы уже давно внедряются на железных дорогах Германии [17] и основываются на спутниковом позиционировании.

При усиленных капитальном и усиленном среднем ремонтах пути первого и второго классов и внеклассного (скоростного) пути ОАО «РЖД» устанавливается специальная реперная система. Предусмотрено построение сети на двух уровнях: опорная геодезическая сеть (ОГС) и рабочая сеть (РС). В ОГС входят главные опорные пункты и пункты сгущения (промежуточные пункты). Главные опорные пункты располагаются попарно на расстоянии между парами 10–12 км и между двумя смежными пунктами – 500–1 000 м. Пункты сгущения размещаются друг от друга на расстоянии 250–750 м. На электрифицированных участках они устанавливаются на опорах контактной сети. Для определения положения рельсовых нитей в сечениях пути используются оптические электронные системы, установленные на машине, или полевые – в виде электронных тахеометров (оптических теодолитов с возмож-

ностью определения расстояний и направлений между точками). Положения опорных пунктов определяются с помощью технологии GPS. Она предусматривает измерение координат на местности, включая высотную координату, с использованием группировок искусственных спутников Земли. В настоящее время используются группировки ГЛОНАСС (Россия) и NAVSTAR (США).

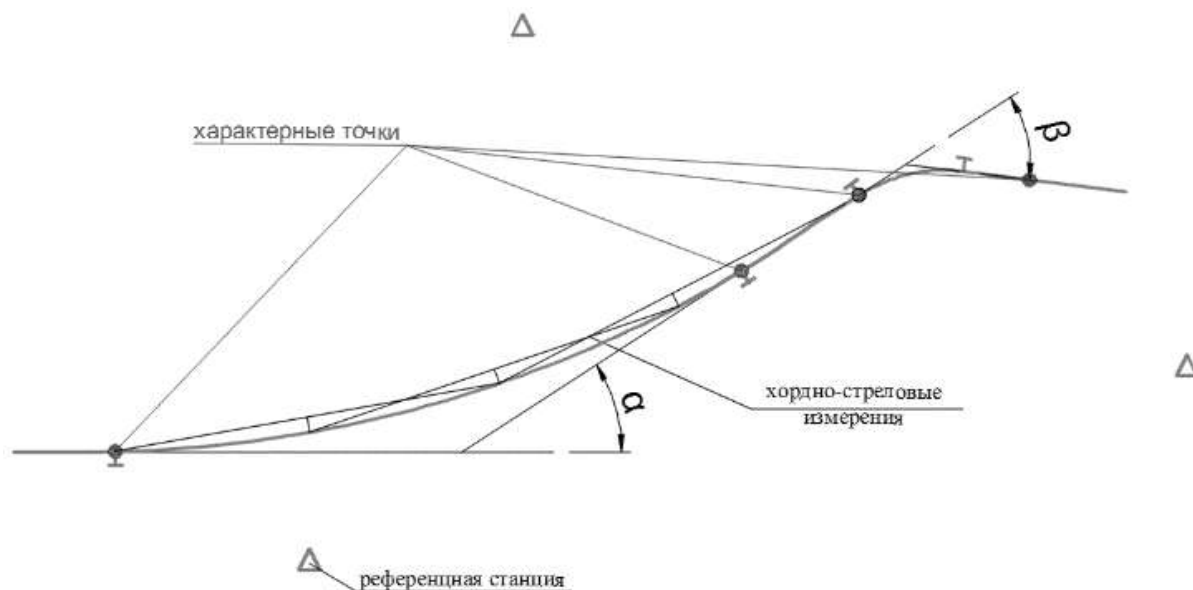
Референциальная сеть предоставляет собой постоянно действующие спутниковые станции, размещенные на пунктах ОГС, по определенной схеме (рис. 10).



Рис. 10. Схема устройства референциальной сети  
Fig. 10. The scheme of the reference network setup

Это особый аппаратно-программный комплекс, который предназначен для обеспечения выполнения измерений, а также для установления пространственного местоположения того или иного объекта. Сведения удастся получить при помощи спутниковых (GNSS), геодезических и навигационных приемников, специального программного обеспечения, компьютерного и иного оборудования [18].

После постановки характерных точек пути в проектное положение необходимо обеспечить его максимальную плавность. Для этого идеально подходят способы, основанные на хордно-стреловых измерениях. Таким образом, при совмещении координатного и хордно-стрелового способов съемки представляется возможным получить качественное положение железнодорожного пути в плане (рис. 11).



**Рис. 11.** Схема комплексной съемки плана пути  
**Fig. 11.** The scheme of the integrated survey of the track plan

### Заключение

Для уравнивания и получения проектного положения в виде координат или рихтовок можно использовать программный комплекс РВПлан [19], в основу которого заложен алгоритм по оптимизации съемки железнодорожного пути [20]. Он содержит уже реализованный комбинированный способ выправки плана железнодорожного пути. Однако важной задачей остается перенести это все на работу выправочных машин, что требует дополнительного изучения и разработки методики выполнения путевых работ по предлагаемой схеме. Из существующих машин данный способ выправки

реализуется только с помощью машины Duomatik с работой в двух режимах по фиксированным точкам и методу сглаживания. В таком случае необходим как минимум двойной проход машины, что повлечет увеличение времени окон.

Таким образом, в местах, где требуется увеличить скорость движения поездов, необходимо применение данного метода. Именно он позволит обеспечить максимальную плавность движения поездов и при этом сохранить проектное пространственное положение оси пути.

### Список литературы

1. Щербаков В.В., Пикалов А.С. Выправка пути при реконструкции и ремонте железнодорожных путей с использованием ГИС-технологий и ГНСС // Транспортное строительство. 2012. № 1. С. 23–26.
2. Корженевич И.П., Торопов Б.И. План железнодорожного пути как один из основных факторов для снижения расходов и повышения скоростей // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог : тр. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск : ИрГУПС, 2009. Т. 2. С. 105–110.
3. Пикалов А.С. Повышение эффективности реконструкции железнодорожного пути за счет применения современных технологий : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2013. 180 с.
4. Лагереv С.Ю., Карпов И.Г. Оптимизация процедур съемки плана железнодорожного пути для его текущего содержания и ремонтов на основе современных технологий. Иркутск : ИрГУПС, 2017. 144 с.
5. Щербаков В.В., Жидов В.М. Применение ГНСС оборудования при определении длины рельсов // Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия : материалы IX Междунар. науч. конф. Новосибирск, 2013. Т. 3. С. 43–45.
6. Щербаков В.В., Жидов В.М., Макушинская М.В. Специальная реперная железнодорожная система // Геодезия и картография. 2010. № 12. С. 12–14.
7. Щербаков В.В., Пикалов А.С. Технология постановки пути в проектное положение с использованием ГЛОНАСС/GPS // Вестн. Сиб. гос. ун-та путей сообщ. 2010. № 22. С. 74–78.
8. Щербаков В.В., Ковалева О.В., Щербаков И.В. Цифровые модели пути - основа геодезического обеспечения проектирования, строительства (ремонта) и эксплуатации железных дорог // Геодезия и картография. 2016. № 3. С. 12–16.
9. Корженевич И. П. Точность съемки плана железнодорожной колеи и пути ее повышения // Висн. Днепропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2009. № 27. С. 116–120.

10. Специальная реперная система контроля состояния железнодорожного пути в профиле и плане. Конструкция и условия установки рабочего репера на металлических опорах контактной сети. Технические требования. М. : МПС РФ, 1998. 5 с.
11. Корженевич И.П. Специальная реперная система для контроля положения пути в плане // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2009. № 25. С. 69–71.
12. Щербаков В.В. Геодезические методы определения геометрических параметров рельсовой колеи // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика : материалы ХLI Междунар. науч. конф. Алматы, 2017. С. 366–371.
13. Инженерная геодезия / Е.Б. Ключин, М.И. Киселев, Д.Ш. Михелев и др. М. : Академия, 2008. 480 с.
14. Щербаков В.В., Загибалова С.С. Экономические показатели внедрения координатного способа определения геометрических параметров рельсовой колеи // Вузы Сибири и Дальнего Востока – Транссибу : тезисы докл. регион. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2002. С. 147–148.
15. Щербаков И.В. Аппаратно-программный комплекс «Профиль-М» для определения пространственных и геометрических параметров рельсовой колеи // Вестник СГУГиТ. 2017. №3 (22). С. 45–60.
16. Щербаков И.В. Геодезические методы определения геометрических параметров рельсовой колеи // Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия : материалы XII Междунар. науч. конф. Новосибирск, 2016. Т. 1. С. 17–23.
17. Marx L. DB Netz uses satellites to locate track in three dimensions. Railway Gazette International. 2008. Nov. P. 872–875.
18. Глушков В.В. Космическая геодезия: методы и перспективы развития. М. : Ин-т политич. и военн. анализа. 2002. 448 с.
19. Корженевич И.П. Выправка кривых и решение задач плана в программе РВПлан // Особенности проектирования и строительства железных дорог в условиях Дальнего Востока : сб. науч. тр. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2009. С. 71–79.
20. Корженевич И.П., Ренгач Н.Г., Лошкарев Н.А. Оценка точности и оптимизация процедур съемки железнодорожных кривых // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2005. № 11. С. 50–60.

### References

1. Shcherbakov V.V., Pikalov A.S. Vypravka puti pri rekonstruktsii i remonte zheleznodorozhnykh putei s ispol'zovaniem GIS-tehnologii i GNSS [Track alignment during reconstruction and repair of railway tracks using GIS technologies and GNSS]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction], 2012, no. 1, pp. 23–26.
2. Korzhenevich I.P., Toropov B.I. Plan zheleznodorozhnogo puti kak odin iz osnovnykh faktorov dlya snizheniya raskhodov i povysheniya skorostei [Plan of the railway track as one of the main factors to reduce costs and increase speeds]. *Trudy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Problemy i perspektivy izyskaniy, proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznykh dorog* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation «Problems and prospects of research, design, construction and operation of railways»]. Irkutsk, 2009. Vol. 2, pp. 105–110.
3. Pikalov A.S. Povyshenie effektivnosti rekonstruktsii zheleznodorozhnogo puti za schet primeneniya sovremennykh tekhnologii [Improving the efficiency of railway track reconstruction through the use of modern technologies]. Ph.D's thesis, Novosibirsk, 2013. 180 p.
4. Lagerev S.Yu., Karpov I.G. Optimizatsiya procedur s'emki plana zheleznodorozhnogo puti dlya ego tekushchego soderzhaniya i remontov na osnove sovremennykh tekhnologii [Optimization of procedures for surveying the railway track plan for its current maintenance and repairs based on modern technologies]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2017. 144 p.
5. Shcherbakov V.V., Zhidov V.M. Primeneniye GNSS oborudovaniya pri opredelenii dliny rel'sov [The use of GNSS equipment in determining the length of rails]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheideriya»: v 3 t* [Proceedings of IX International Scientific Conference «Geodesy, Geoinformatics, cartography, surveying»: in 3 vol.]. Novosibirsk, 2013. Vol. 3, pp. 43–45.
6. Shcherbakov V.V., Zhidov V.M., Makushinskaya M.V. Spetsial'naya repornaya zheleznodorozhnaya sistema [Special reference railway system]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and cartography], 2010, no. 12, pp. 12–14.
7. Shcherbakov V.V., Pikalov A.S. Tekhnologiya postanovki puti v proektnoe polozhenie s ispol'zovaniem GLONASS/GPS [Technology of setting the track into the design position using GLONASS/GPS]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2010, no. 22, pp. 74–78.
8. Shcherbakov V.V., Kovaleva O.V., Shcherbakov I.V. Tsifrovyye modeli puti – osnova geodezicheskogo obespecheniya proektirovaniya, stroitel'stva (remonta) i ekspluatatsii zheleznykh dorog [Digital models of the track as a basis of geodetic support for the design, construction (repair) and operation of railways]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and Cartography], 2016, no. 3, pp. 12–16.
9. Korzhenevich I.P. Tochnost' s'emki plana zheleznodorozhnoi kolei i puti ee povyzheniya [Accuracy of the survey of the railway gauge plan and the ways to increase it]. *Visnik Dnepropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana* [The Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of the Railway transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, no. 27, pp. 116–120.
10. Spetsial'naya repornaya sistema kontrolya sostoyaniya zheleznodorozhnogo puti v profile i plane. Konstruktsiya i usloviya ustanovki rabocheho repera na metallicheskiykh oporakh kontaktnoi seti. Tekhnicheskie trebovaniya [Special reference system for monitoring the condition of the railway track in profile and plan. Design and installation conditions of the working reference point on metal supports of the contact network. Technical requirements]. Moscow: MPS RF Publ., 1998. 5 p.
11. Korzhenevich I.P. Special'naya repornaya sistema dlya kontrolya polozheniya puti v plane [A special reference system for monitoring the position of the track in the plan]. *Visnik Dnepropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana* [The Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of the Railway transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, no. 25, pp. 69–71.

12. Shcherbakov V.V. Geodezicheskie metody opredeleniya geometricheskikh parametrov rel'sovoi kolei [Geophysical methods for determining the geometric parameters of the track]. *Materialy XLI Mezhdunarodnoi nauchnoi konf. «Innovatsionnye tekhnologii na transporte: obrazovanie, nauka, praktika»* [Proceedings of the XLI International scientific Conference «Innovative technologies in transport, education, science, practice»]. Almaty, 2017, pp. 366–371.

13. Klyushin E.B., Kiselev M.I., Mikhelev D.Sh., Fel'dman V.D. Inzhenernaya geodeziya [Engineering geodesy]. Moscow: Akademiya Publ, 2008. 480 p.

14. Shcherbakov V.V., Zagibalova S.S. Ekonomicheskie pokazateli vnedreniya koordinatnogo sposoba opredeleniya geometricheskikh parametrov rel'sovoi kolei [Economic indicators of the introduction of a coordinate method for determining geometric parameters of a rail track]. *Tezisy dokladov regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Vuzy Sibiri i Dal'nego Vostoka – Transsibu»* [Theses of reports of the regional scientific and practical conference «Universities of Siberia and the Far East for Transsib»]. Novosibirsk, 2002, pp. 147–148.

15. Shcherbakov I.V. Apparato-programmnyi kompleks «Profil'-M» dlya opredeleniya prostranstvennykh i geometricheskikh parametrov rel'sovoi kolei [Hardware and software complex «Profile-M» for determining the spatial and geometric parameters of the rail track]. *Vestnik SGUGiT* [Bulletin of SGUGiT], 2017, no. 3(22), pp. 45–60.

16. Shcherbakov I.V. Geodezicheskie metody opredeleniya geometricheskikh parametrov rel'sovoi kolei [Geodesic methods for determining geometric parameters of a rail track]. *Materialy XII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheideriya» v 2 t.* [XII International Scientific Conference «Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Surveying» in 2 volumes]. Novosibirsk, 2016. Vol. 1, pp. 17–23.

17. Marx L. DB Netz uses satellites to locate track in three dimensions. *Railway Gazette International*. 2008. Nov, pp. 872–875.

18. Glushkov V.V. Kosmicheskaya geodeziya: metody i perspektivy razvitiya [Space Geodesy: methods and prospects of development]. Moscow: Institut politicheskogo i voennogo analiza Publ., 2002. 448 p.

19. Korzhenevich I.P. Vypravka krivykh i reshenie zadach plana v programme RVPlan [Straightening curves and solving problems of the plan in the RVPlan program]. *Sbornik nauchnykh trudov «Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva zheleznykh dorog v usloviyakh Dal'nego Vostoka»* [Proceedings of scientific papers «Features of the design and construction of railways under the conditions of the Far East»]. Khabarovsk, 2009, pp. 71–79.

20. Korzhenevich I.P., Rengach N.G., Loshkarev N.A. Otsenka tochnosti i optimizatsiya procedur s'emki zheleznodorozhnykh krivykh [Evaluation of accuracy and optimization of procedures for shooting railway curves]. *Visnik Dnepropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana* [The Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of the Railway transport named after Academician V. Lazaryan], 2005, no. 11, pp. 50–60.

### Информация об авторах

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

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

**Насников Дмитрий Николаевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: nasnikov@gmail.com.

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

### Information about the authors

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

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

**Dmitrii N. Nasnikov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Department of the Path and path facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: nasnikov@gmail.com.

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

## Применение демодуляции при оценке технического состояния подшипников

Л.В. Мартыненко✉

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

✉liuba.martinenko@yandex.ru

### Резюме

В настоящее время количество отцепок грузовых вагонов из-за неисправностей подшипниковых узлов слишком велико и для предотвращения их роста необходимо внедрение современного контроля и диагностики деталей данного механизма. На вагоноремонтных предприятиях ОАО «Российские железные дороги» применяются различные средства диагностики, которые оценивают техническое состояние деталей и узлов грузовых вагонов с помощью высокочастотных приборов, улавливающих любые изменения внутри, а также на поверхности деталей, что позволяет при разных частотах вращения выявлять определенные дефекты, которые будут создавать дополнительные колебания для динамики подвижного состава. Информация о таких дефектах преобразуется в спектральные диаграммы, способных фиксировать определенную вибрацию, вызванную в связи с отклонением в техническом состоянии детали. Среди большого количества вибродиагностических приборов с разными видами сигналов наибольшее распространение получила аппаратура, основанная на принципе детектирования, в соответствии с которым преобразуются высокочастотные колебания амплитуды в низкочастотные, благодаря чему появляется возможность выявить дефекты деталей подшипника. Для данного процесса основной задачей является не только преобразование высокочастотных сигналов, но и воспроизведение низкочастотного модулирующего сигнала, который может иметь вид скачка напряжения на диаграмме. Базой для метода огибающей спектра является анализ высокочастотной вибрации и последующее выявление низкочастотных модулированных вибрационных сигналов. Если выделить из высокочастотного сигнала его низкочастотную составляющую, которая называется огибающей сигнала, тогда можно будет судить о месте возникновения дефекта по частотному расположению амплитудных пиков в спектре огибающей.

### Ключевые слова

подшипниковый узел, высокочастотный прибор, детектирование, детектор, виброакустический сигнал, низкочастотный модулирующий сигнал, спектральные диаграммы, динамика подвижного состава

### Для цитирования

Мартыненко Л.В. Применение демодуляции при оценке технического состояния подшипников / Л.В. Мартыненко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. № 2 (74). – С. 69–79. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).69-79.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 27.04.2022 г.; поступила после рецензирования: 27.06.2022 г.; принята к публикации: 28.06.2022 г.

## Using demodulation in assessment of the technical condition of bearings

L.V. Martynenko✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉liuba.martinenko@yandex.ru

### Abstract

The current cases of freight cars uncoupling due to failures of bearing units are too numerous, and to prevent their growth, introduction of modern control and diagnostics of the parts of such unit is required. Car repair enterprises use a wide range of diagnostic equipment to assess the technical condition of the axle box units of freight cars using high frequency instruments detecting any changes inside the part as well as on its surface, allowing under different rotation frequencies to reveal certain defects which may create additional vibrations for the rolling stock dynamics. The information about such defects is transformed into spectral diagrams capable to detect a certain vibration caused by deviations in the part's technical condition. Among the wide range of vibro-diagnostic instruments with different types of signals, the most frequently used is the equipment based on detection principle, according to which the high-frequency amplitude oscillations are converted into low-frequency ones, which makes it possible to reveal defects in the bearing parts. For this process the basic task is not just converting the high frequency signals, but also reproducing a low-frequency modulating signal which may look like a power surge in the diagram. The basis for the envelope spectrum method is the analysis of high-frequency vibration and the subsequent detection of low-frequency modulated vibration signals. If we extract from the high-frequency signal its low-frequency component, which is called the signal envelope, then it will be possible to judge the place of the defect by the frequency location of the amplitude peaks in the envelope spectrum.

### Keywords

bearing assembly, high-frequency device, detection, detector, vibroacoustic signal, low-frequency modulating signal, spectral diagrams, dynamics of rolling stock

**For citation**

Martynenko L.V. Primenenie demodulyatsii pri otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya podshipnikov [Using demodulation in assessment of the technical condition of bearings]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 69–79. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).69-79.

**Article Info**

R Received: April 27, 2022; revised: June 27, 2022; accepted: June 28, 2022.

**Введение**

Отказы буксового узла в процессе эксплуатации в настоящее время являются одной из основных причин отцепок вагонов, которые негативно влияют на качественные показатели грузооборота в стране [1]. В настоящее время количество отцепок грузовых вагонов в текущий ремонт из-за неисправностей буксового узла слишком велико. Для компенсации их большого количества необходимо внедрение современного оборудования, которое позволит ускорить процесс диагностики и снизить влияние человеческого фактора, что позволит ввести колесную пару в эксплуатацию раньше и увеличить грузооборот.

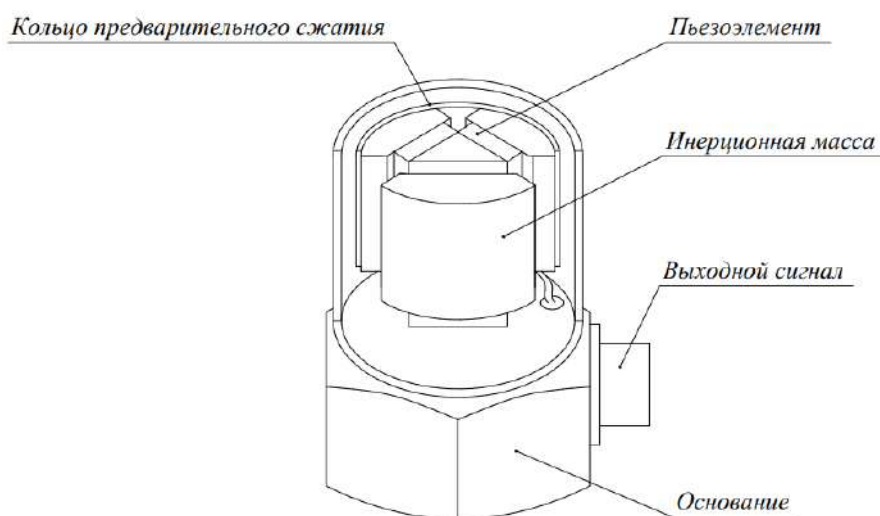
Вибрационная диагностика может не только помочь в увеличении грузооборота, но и снизить риск возникновения опасных ситуации путем своевременного обнаружения неисправностей [2]. Разновидность выявления таких дефектов очень многообразна, начиная с дефектов, которые определяют «на слух» и заканчивая разночастотными вибрационными сигналами в виде спектральных диаграмм [3].

Вибродиагностика предназначена для определения технического состояния механизма путем измерения виброакустических сигна-

лов, исходящих от взаимодействующих друг с другом дефектных деталей. При наличии в механизме возрастает уровень вибрации, следовательно, растет главный параметр в диагностировании вращающихся механизмов – виброускорение. Контроль значений виброускорения дает возможность определять не только существующие неисправности, но и зарождающиеся дефекты механизма [4].

У всех деталей вращающегося механизма существуют свои пороги виброускорения и частота вибрации, поэтому зная только повышенный уровень вибрации всего узла нельзя определить какая деталь вызвала данную вибрацию. Для определения повышенных колебаний определенной детали необходимо воспользоваться спектральным анализом, который покажет все отклонения амплитуд вибрации определенных элементов механизма [5]. Для данных замеров применяется пьезоэлектрический акселерометр, который фиксирует динамические изменения механических переменных [6].

Как и все преобразователи, пьезоэлектрические преобразуют одну форму энергии в другую и подают электрический сигнал в ответ на измеряемую величину, свойство или состояние (рис 1) [7].



**Рис.1.** Пьезоэлектрический вибропреобразователь ускорения с элементом, работающим на сдвиг  
**Fig. 1.** Piezoelectric vibration acceleration converter with a shear-operated element

Чувствительный элемент датчика состоит из массы, прикрепленной посредством пьезоэлектрического элемента к основанию тем самым при возникновении вибрации и ударов внутренний инерционный элемент стремится остаться на месте, а пьезоэлемент подвергается действию внешней силы и деформируется, что приводит к возникновению на нем электрического заряда прямо пропорционального величине ускорения. Поверхностный зарядовый сигнал, снимается с электродов и усиливается усилителем заряда, а далее с усилителя заряда напряжение подается на вход измерительного прибора, где преобразуется в цифровой код и передается на компьютер, где преобразуется в среднее квадратичное значение виброускорения и отображается на экране монитора. Для определения состояния деталей подшипника полученные значения среднее квадратичного ускорения сравниваются со значениями эталонной колесной пары. Так как движением в данном случае является вращение, то в случае появления какой-либо неуравновешенности траектории вращающихся деталей нарушаются и это приводит к

появлению дополнительных ускорений в основном в диапазонах частот колебаний той детали, механическое состояние которой нарушено. Это выражается в росте амплитуд ускорений (скоростей и смещений) в спектре, полученном по записям колебаний какой-либо точки механизма (рис.2) [8].

Метод диагностики при помощи спектров огибающей вибросигнала состоит из нескольких этапов. Для начала необходимо выделить необходимые вибросигналы из общего уровня вибрации. При взаимодействии деталей подшипника качения друг с другом и с повреждениями вызывает удары, следовательно, и вибрации в опоре подшипника. Пьезоэлектрический вибропреобразователь измеряет ускорение, сигнал которого проходит через полосовой фильтр, вследствие чего в вибросигнале остаются только компоненты в диапазоне частот, вызвавших удары деталей подшипника. Далее сигнал, прошедший через фильтр, выпрямляется, из которого выделяется огибающая и удаляются резонансные частоты элементов подшипника, вследствие чего остаются только частоты вибрации,

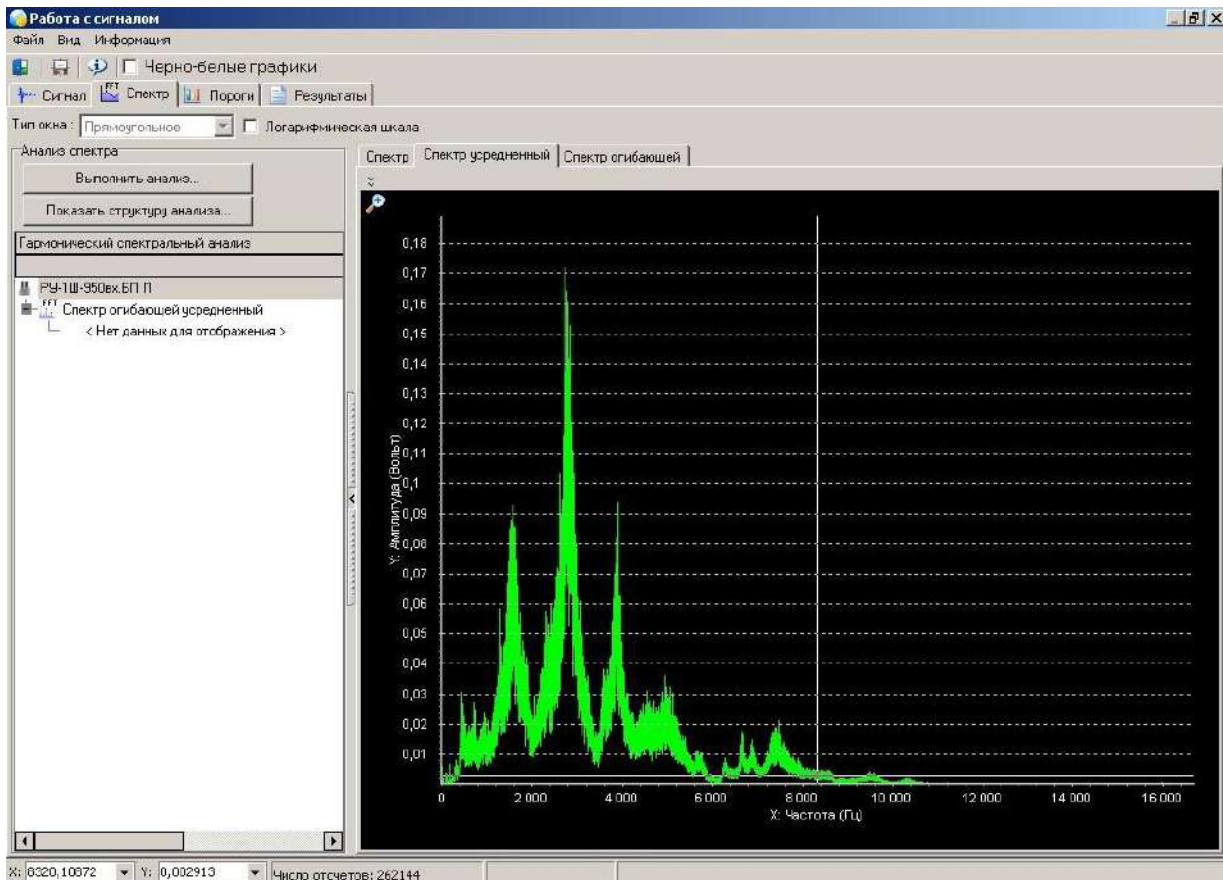


Рис. 2. Спектральная диаграмма при локализации дефекта  
Fig. 2. Spectral diagram for defect localization



вызванные дефектами деталей подшипника. Затем вычисляется спектр путем применения фильтра высоких частот, который удаляет из сигнала компоненты с высокой частотой.

Одной из характеристик отклонения плотности вероятности  $p(x)$  от нормального распределения является эксцесс, определяемый как  $E_k = \mu_4/\sigma^4 - 3$ , где  $\mu_4$  – четвертый центральный момент,  $\sigma^4$  – дисперсия случайной величины. Здесь «минус три» введено в определение коэффициента эксцесса, чтобы удовлетворить требованию  $E_k = 0$  для нормального распределения. В случае исправного подшипника плотность вероятности стационарных случайных вибраций, которые наблюдаются в исправном подшипнике за счет сил трения, можно считать

соответствующей нормальному закону. Появление дефектов, сопровождающихся ударами между телами и дорожками качения подшипников, приводит к изменению формы кривой плотности вероятности  $p(x)$  и, соответственно, изменению численного значения коэффициента эксцесса  $E_k$ . Чем более развит дефект, тем более островершинной становится кривая плотности вероятности [9].

На рис. 3 представлены пороги для среднеквадратичных значений (СКЗ) и эксцесса неисправной колесной пары, а также измеренные данные и вероятные дефекты, для исправной колесной пары пороги СКЗ не предусмотрено (табл. 1) [10].

**Таблица 1.** Результаты пороговых сравнений среднеквадратичных значений и эксцесса для колесной пары

**Table 1.** Threshold comparison results for rms values and kurtosis for wheelset

№	Параметр	Предельный уровень	Измеренный уровень	Наименование дефекта
1	Среднеквадратичное значение	5	2,428651	Повышенный уровень вибрации
2	Эксцесс	8	3,147074	Повреждение контактирующих поверхностей



**Рис. 3.** Пороги для среднеквадратичного значения и эксцесс неисправной буксы

**Fig. 3.** Threshold for rms value and faulty axle box kurtosis

Результаты пороговых сравнений СКЗ показывают, что в исследуемой колесной паре присутствует повышенный уровень вибрации, а из сравнения эксцесса видно, что причиной повышенной вибрации является повреждение контактирующих поверхностей. Таким образом, проведение вибродиагностики позволяет выявить отклонение вибросигнала, а также установить причину данного отклонения [11]. О техническом состоянии подшипника буксового узла также говорят следующие параметры амплитудно-временных порогов: среднеквадратичное ускорение и эксцесс. Превышение данных параметров не допускает дальнейшую эксплуатацию буксового узла. В рассмотренном случае превышение установленной нормы среднеквадратичного ускорения привело к увеличению уровня вибрации. Амплитудно-временные пороги представлены на рис. 3. На рис. 4 представлены результаты проведенной диагностики для обеих колесных пар.

Представленный анализ наглядно показывает работу вибродиагностического ком-

плекса, его основные функции и достоинства, главное из которых – выявление точной области образования повышенной вибрации, а также определение самого источника вибрации, в нашем случае это дефекты тел качения [12].

Для подтверждения актуальности проблематики в представленной статье выполнен анализ отказов технических средств и дефектов буксового узла, что послужит обоснованием внедрения вибродиагностических комплексов для диагностики буксовых узлов на вагоноремонтных предприятиях по всей сети железных дорог [13].

Статистические данные отцепок грузовых вагонов в ТР-2 по отдельным неисправностям буксового узла за пять лет эксплуатации показаны на рис. 5, на рис. 6 – общее количество отказов. Также на отцепку вагонов влияет состояние пути, что создает дополнительные вибрации и повышенную силу удара при просадках определенной длины и глубины, от чего происходит постепенное разрушение буксового узла [14].

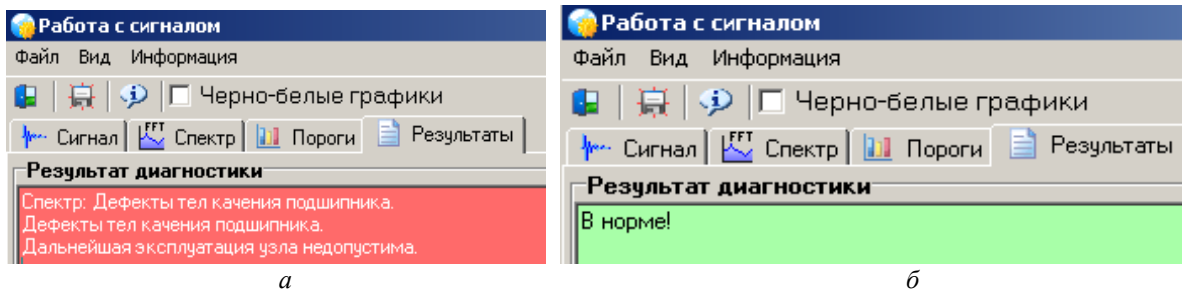


Рис. 4. Спектральный анализ диагностики неисправной (а) и исправной колесной пары (б)  
Fig. 4. Spectral analyses of fault diagnostics (a) and serviceable wheelset (b)



Рис. 5. Отцепки вагонов по неисправностям буксового узла в 2017–2021 гг.  
Fig. 5. Car uncoupling due to axle box faults in 2017–2021

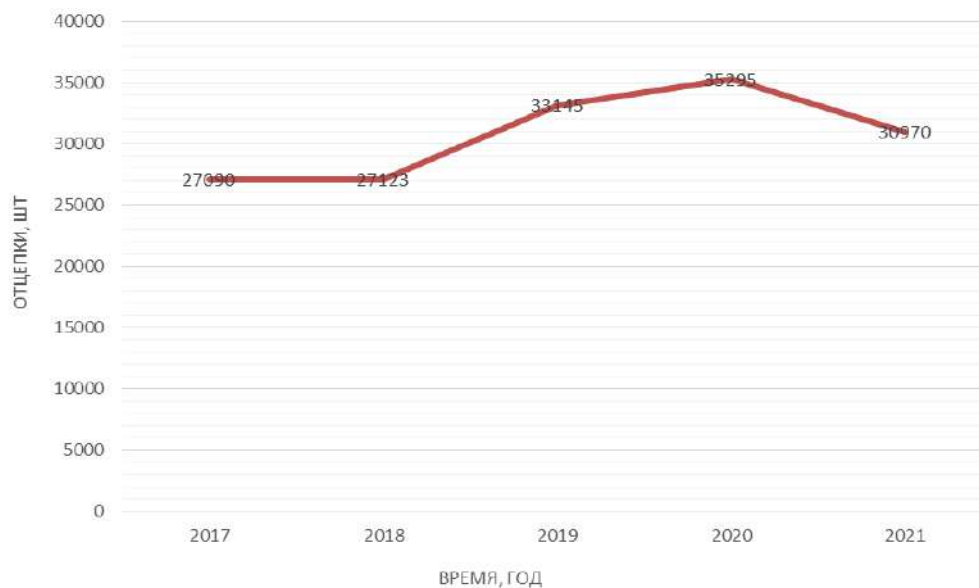


Рис. 6. Количество отцепок грузовых вагонов за 2017–2021 гг.

Fig. 6. Number of freight car uncouplings in 2017–2021

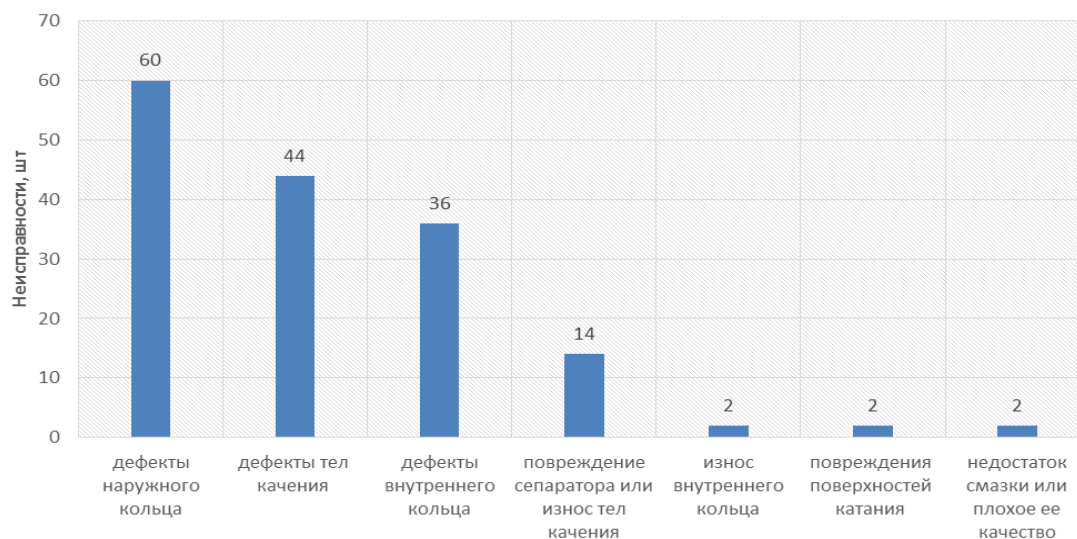


Рис. 7. Количество дефектов деталей и узлов буксы

Fig. 7. Number of defects in parts and joints of an axle box

Прочими неисправностями, ставшими по количеству вторыми из источников причин отцепок грузовых вагонов, являются: излом, износ сепаратора; наличие посторонних примесей в смазке; избыток, недостаток смазки; излом, трещина упорного кольца; трещины, изломы внутреннего и наружного колец подшипника; неправильный подбор осевых или радиальных зазоров; разница роликов по длине или диаметру более допустимой; дефекты лабиринтных уплотнений; полное разрушение подшипника; неравномерный износ опорных поверхностей корпусов букс [15]. На рис. 7 приведено коли-

чество прочих дефектов, послуживших причиной отцепки вагонов в 2017–2021 гг.

После диагностирования более семидесяти колесных пар было выявлено, что наибольшее число дефектов связано с наружными кольцами – 37 % от общего числа неисправностей [16]. Больше всего дефектов наружного кольца было выявлено при частотах вибрации 45–52 Гц (20 % от всех неисправностей) (рис. 8). Дефекты тел качения составили 27,5 % от общего количества, по большей части были выявлены при частотах вибрации 15–32 Гц (21 %) (рис. 9) [17]. Дефекты внутреннего кольца в

общем составили 22,5 %, были обнаружены практически в равном количестве при частотах вибрации 8–15 Гц и 52–78 Гц (рис. 10). Повреждения сепаратора или износ тел качения выявляются при частоте вибрации 2–3 Гц (9 % от общего числа неисправностей). Износ внутреннего кольца, повреждения поверхностей катания подшипника и недостаток смазки или плохое ее качество составляют по 2% от общего числа неисправностей.

Отцепки по причине наличия шелушения, коррозии, усталостных раковин деталей подшипника снизились к 2021 г. на 12,55 %, что составило 13,05 % от общего количества отцепок. Также снизилось количество отцепок и по прочим дефектам – на 4,34 % (17,92 % от всех отцепок). Число отцепок из-за неисправностей лабиринтных колец, составляющее 6,5 % от всех отцепок, в течение всего периода эксплуа-

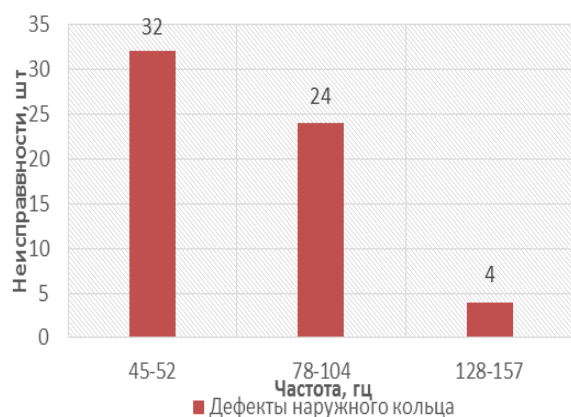
тации оставалось примерно на одном уровне. В 2021 г. на 11,19 % увеличилось число отцепок из-за надиров типа «елочка» – 5,29 % от общего количества. Дефекты на поверхности катания подшипника к 2021 г. стали причиной 1,25 % отцепок. В 2021 г. относительно 2017 г. число отцепок увеличилось почти в 37 раз, пик роста пришелся на 2020 г., когда количество отцепок увеличилось в 125 раз. Далее был резкий спад, но относительно 2017 г. число отцепок по данной причине осталось на высоком уровне. Общее количество отцепок за пять лет эксплуатации увеличилось на 14,32 %, а среднегодовой темп роста составил 3,4 % т. е. плюс 970 отцепок в среднем ежегодно [18].

Выявленные при диагностике буксового узла на вибродиагностическом стенде при разных частотах дефекты подшипника приведены в табл. 2.

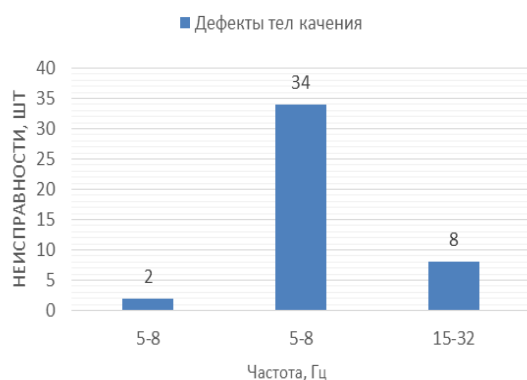
**Таблица 2.** Неисправности буксового узла, выявленные при различных частотах вибрации  
**Table 2.** Axle box faults revealed under different vibration frequencies

Частоты, Гц Frequencies, Hz	Наименование дефекта Fault denomination	Всего неисправностей, шт. Faults total number, piece	Доля неисправностей, % Share of faults, %
2-3	Повреждение сепаратора или износ тел качения Separator damage or rolling element failure	14	9
4-5	Износ внутреннего кольца Inner ring wear	2	1
5-8	Дефекты тел качения Rolling element faults	2	1
8-15	Дефекты внутреннего кольца Inner ring faults	12	8
15-32	Дефекты тел качения Rolling element faults	34	21
32-45	Дефекты тел качения Rolling element faults	8	5
45-52	Дефекты наружного кольца Outer ring faults	32	20
52-78	Дефекты внутреннего кольца Inner ring faults	14	9
78-104	Дефекты наружного кольца Outer ring faults	24	15
104-128	Дефекты внутреннего кольца Inner ring faults	6	4
128-157	Дефекты наружного кольца Outer ring faults	4	3
157-184	Дефекты внутреннего кольца Inner ring faults	4	3
184-900	Повреждения поверхностей катания Damage of rolling surfaces	2	1
900-2000	Недостаток смазки или плохое ее качество Lack or low quality of lubrication	2	1
Итого		160	100

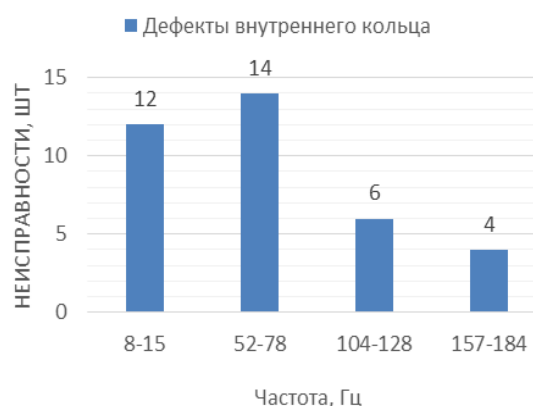
В рассмотренном случае к дополнительным вибрациям колесной пары привели дефекты внутреннего кольца подшипника, которые выявились при частотах от 8 до 15 Гц, т. е. во время перемещения в этом диапазоне возникает дисбаланс, негативно влияющий на динамику движения подвижного состава. Дефекты, возникающие в деталях подшипника, основываются на напряжениях в металле при нарушениях технологии напрессовки, усталостных разрушениях металла, базирующихся на ограниченном сроке эксплуатации любых деталей и нарушении эксплуатации подшипников в производстве и процессе движения, когда происходят изменения при влиянии динамических нагрузок и появления вибрации, основанной на дефектах поверхности катания и т.д. При наличии вышеперечисленных причин возникновения дефектов дальнейшая эксплуатация буксового узла невозможна.



**Рис. 8.** Дефекты наружного кольца подшипника  
**Fig. 8.** Defects in the outer ring of the bearing



**Рис. 9.** Дефекты тел качения подшипника  
**Fig. 9.** Defects in rolling elements of the bearing



**Рис. 10.** Дефекты внутреннего кольца подшипника  
**Fig. 10.** Defects in the inner ring of the bearing

Напряжения, возникающие в деталях подшипников, приводят к образованию микротрещин и в процессе эксплуатации микротрещина переходит в следующее состояние – макротрещину, что приводит к расколу внутренних колец. Данное отклонение связано с нарушениями технологий при напрессовке и в процессе эксплуатации, а также при неправильном подборе колец по собственному диаметру и шейке оси, что является причиной образования зазора между кольцом и шейкой оси. При технологическом процессе напрессовки производится обработка колец шлифовкой, что вызывает определенные изменения в отдельных слоях колец и может приводить к повышению температуры и изменению внутреннего состояния металла. Когда происходит остывание металла, то в верхних наружных слоях возникают определенные растягивающие напряжения, а в нижних слоях появляются напряжения сжатия. Данные напряжения, возникающие в поверхностных волокнах, могут достигать значений 400–1000 МПа. При учете особенностей механических свойств стали возникновение дополнительных напряжений происходит при незначительном увеличении нагрузки, так как сквозное прокаливание данных деталей делает их чувствительными и хрупкими. Поэтому зарождение трещин является результатом суммирования напряжений самого металла и напряжений, которые образуются в результате напрессовки колец.

Далее показана динамика и общее количество отцепок грузовых вагонов в ТР-2 из-за неисправностей буксовых узлов (табл. 3) [19].

**Таблица 3.** Динамика причин отцепок за 2017–2021 гг.  
**Table 3.** Dynamics of the uncoupling causes for 2017–2021

Причины	2017		2018		2019		2020		2021		
	Всего, шт.	Доля, %	Всего, шт.	% к 2017	Всего, шт.	% к 2018	Всего, шт.	% к 2019	Всего, шт.	% к 2020	Доля, %
Ослабление (разрушение) торцевого крепления	9 363	34,56	11 359	121,32	12 213	107,52	12 045	98,62	10 206	109,00	32,95
Обводнение смазки	2 615	9,65	2 872	109,83	3 646	126,95	5 411	148,41	5 022	192,05	16,22
Шелушение, раковины, коррозия подшипников	4 622	17,06	3 800	82,22	4 045	106,45	4 109	101,58	4 042	87,45	13,05
Проворот внутреннего кольца	1 197	4,42	1 313	109,69	1 753	133,51	2 095	119,51	2 091	174,69	6,75
Неисправности лабиринтных колец	2 006	7,40	1 873	93,37	2 000	106,78	2 081	104,05	2 014	100,40	6,50
Надиры типа «елочка»	1 474	5,44	1 239	84,06	2 162	174,50	1 846	85,38	1 639	111,19	5,29
Дефекты на поверхности катания	11	0,04	45	409,09	5 10	1133,3	1 383	271,18	4 06	3690,9	1,31
Прочее	5 802	21,42	4 622	79,66	6 816	147,47	6 325	92,80	5 550	95,66	17,92
Итого	27 090	100,00	27 123	100,12	33 145	122,20	35 295	106,49	30 970	114,32	100,00

## Заключение

В данной статье рассмотрена вибродиагностика подшипников приборами с разными видами сигналов, которые могут при различной частоте выявлять все виды дефектов с помощью преобразования высокочастотных колебаний амплитуды в низкочастотные. Это позволя-

ет обнаружить нарушение формы деталей подшипника, так как для каждого отклонения просматривается большой спектр диапазонов частот и именно демодуляция получила широкое применение при техническом обслуживании подшипников.

## Список литературы

1. Лукин В.В., Анисимов В.Н., Котуранов В.Н. Конструирование и расчет вагонов. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2011. 688 с.
2. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М. : Транспорт, 1986. 558 с.
3. Желнин Г.Г., Певзнер В.О., Шинкарев Б.С. Исследование зависимостей между показателями динамики подвижного состава и воздействия его на путь // Труды ВНИИЖТ. 1975. № 542. С. 84–92.
4. Миколайчук Т.А. Эффективность использования современных средств диагностики подвижного состава // Научное сообщество студентов: междисциплинарные исследования : материалы XXIII междунар. студен. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2017. С. 162–167.
5. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона. М. : Транспорт, 1991. 360 с.
6. Лукин В.В., Анисимов П.С., Федосеев Ю.П. Вагоны. Общий курс. М. : Маршрут, 2004. 424 с.

7. Грачева Л.О., Певзнер В.О., Анисимов П.С. Показатели динамики и воздействия на путь грузовых четырехосных вагонов при различных износах тележек и отступлениях от норм содержания в прямых участках пути // Труды ВНИИЖТ. 1976. № 549. С. 4–25.
8. Ромен Ю.С., Николаев В.Е. Исследование влияния детерминированных неровностей пути в плане на уровень боковых сил при движении грузового вагона // Проблемы механики железнодорожного транспорта. Киев : Наук. думка, 1980. С. 40–42.
9. Кудрявцев Н.Н. Динамические нагрузки ходовых частей грузовых вагонов. М. : Транспорт, 1977. 143 с.
10. Кудрявцев Н.Н. Исследования динамики необрессоренных масс вагонов. М. : Транспорт, 1965. 168 с.
11. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь. М. : Транспорт, 1987. 479 с.
12. Нагорная Ж.А. Текущее содержание пути. М. : Маршрут, 2006. 62 с.
13. Тихомиров В.И. Содержание и ремонт железнодорожного пути. М. : Транспорт, 1969. 344 с.
14. Амелин С. В., Дановский Л.М. Путь и путевое хозяйство. М. : Транспорт, 1972. 214 с.
15. Скалов А.Д., Коваль В.А. Методика исследования вертикальных и боковых сил при износных испытаниях рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 1980. № 6. С. 15–20.
16. Инновационные вагоны и проблемы их взаимодействия с элементами инфраструктуры / В.Н. Филиппов, А.В. Смолянинов, И.В. Козлов и др. // Безопасность движения поездов : материалы XVII науч.-практ. конф. М., 2016. С. 68–73.
17. Мямлин С.В. Моделирование динамики рельсовых экипажей. М. : Новая идеология, 2002. 240 с.
18. Кузович В.М. Динамическая нагруженность специализированных вагонов в криволинейных участках пути : дис. ... канд. техн. наук. М. : 2010. 211 с
19. Маджидов Ф.А. Оценка параметра безопасности грузового вагона и управление эффективностью его использования с учетом изменения параметров эксплуатационной среды // Безопасность движения поездов : материалы XVII науч.-практ. конф. М. : МИИТ, 2016. С. 96–98.

### References

1. Lukin V.V., Anisimov V.N., Koturanov V.N. Konstruirovaniye i raschet vagonov [Design and calculation of wagons]. Moscow: UMTS ZHDT Publ., 2011. 688 p.
2. Verigo M.F., Kogan A.Ya. Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava [Interaction of path and rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1986. 558 p.
3. Zhelmin G.G., Pevzner V.O., Shinkarev B.S. Issledovanie zavisimosti mezhdu pokazatelyami dinamiki podvizhnogo sostava i vozdeistviya ego na put' [Investigation of dependencies between indicators of rolling stock dynamics and its impact on the path]. *Trudy VNIIZhT* [Proceedings of VNIIZhT], 1975, no. 542, pp. 84–92.
4. Mykolaichuk T.A. Effektivnost' ispol'zovaniya sovremennykh sredstv diagnostiki podvizhnogo sostava [Efficiency of using modern means of rolling stock diagnostics]. *Materialy XXIII mezhdunarodnoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnoe soobshchestvo studentov: mezhdistitsiplinarnye issledovaniya»* [Proceedings of the XXIII International Student Scientific and Practical Conference «Scientific community of students: interdisciplinary research»]. Novosibirsk, 2017, pp. 162–167.
5. Vershinskii S.V., Danilov V.N., Khusidov V.D. Dinamika vagona [Wagon Dynamics]. Moscow: Transport Publ., 360 p.
6. Lukin V.V., Anisimov P.S., Fedoseev Yu.P. Vagony. Obshchii kurs [Wagons. General course]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 424 p.
7. Gracheva L.O., Pevzner V.O., Anisimov P.S. Pokazateli dinamiki i vozdeistviya na put' gruzovykh chetyrekhosnykh vagonov pri razlichnykh iznosakh telezhok i otstupleniyakh ot norm soderzhaniya v pryamykh uchastkakh puti [Indicators of the dynamics and impact on the track of freight four-axle cars with various wear of bogies and deviations from the standards of maintenance in straight sections of the track]. *Trudy VNIIZhT* [Proceedings of VNIIZhT], 1976, no. 549, pp. 4–25.
8. Romen Yu.S., Nikolaev V.E. Issledovanie vliyaniya determinirovannykh nerovnostei puti v plane na uroven' bokovykh sil pri dvizhenii gruzovogo vagona [Investigation of the influence of deterministic track irregularities in the plan on the level of lateral forces during the movement of a freight car]. *Problemy mekhaniki zheleznodorozhnogo transporta* [Problems of Railway Transport Mechanics]. Kiev, 1980, pp. 40–42.
9. Kudryavtsev N.N. Dinamicheskie nagruzki khodovykh chastei gruzovykh vagonov [Dynamic loads of running parts of freight cars]. Moscow: Transport Publ., 1977. 144 p.
10. Kudryavtsev N.N. Issledovaniya dinamiki neobressorenykh mass vagonov [Studies of the dynamics of unsprung masses of cars]. Moscow: Transport Publ., 1965. 168 p.
11. Shakhunyan G.M. Zheleznodorozhnyi put' [Railway track]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p.
12. Nagornaya Zh.A. Tekushchee soderzhanie puti [The current maintenance of the path]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 62 p.
13. Tikhomirov V.I. Soderzhanie i remont zheleznodorozhnogo puti [Maintenance and repair of the railway track]. Moscow: Transport Publ., 1969. 344 p.
14. Amelin S.V., Danovskii L.M. Put' i putevoe khozyaistvo [Track and track facilities]. Moscow: Transport Publ., 1972. 214 p.
15. Skalov A.D., Koval V.A. Metodika issledovaniya vertikal'nykh i bokovykh sil pri iznosnykh ispytaniyakh rel'sov [Technique for the study of vertical and lateral forces during wear tests of rails]. *Vestnik VNIIZhT*, [Bulletin of VNIIZHT], 1980, no. 6, pp. 15–20.
16. Fillipov V.N., Smolyaninov A.V., Kozlov I.V., Podlesnikov Ya.D. Innovatsionnye vagony i problemy ikh vzaimodeistviya s elementami infrastruktury [Innovative cars and problems of their interaction with infrastructure elements]. *Materialy XVII Nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bezopasnost' dvizheniya poezdov»* [Proceedings of the XVII Scientific and Practical Conference «Train Traffic Safety»]. Moscow, 2016, pp. 68–73.

17. Myamlin S.V. Modelirovanie dinamiki rel'sovykh ekipazhei [Modeling the dynamics of rail vehicles]. Moscow: Novaya ideologiya Publ., 2002. 240 p.

18. Kuzovich V.M. Dinamicheskaya nagruzhennost' spetsializirovannykh vagonov v krivolineinykh uchastkakh puti [Dynamic loading of specialized wagons in curved sections of the track]. Ph.D's thesis. Moscow, 2010, 211 p.

19. Madzhidov F.A. Otsenka parametra bezopasnosti gruzovogo vagona i upravlenie effektivnost'yu ego ispol'zovaniya s uchetom izmeneniya parametrov ekspluatatsionnoi sredy [Estimation of the safety parameter of a freight car and management of the efficiency of its use, taking into account changes in the parameters of the operating environment]. *Materialy XVII Nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bezopasnost' dvizheniya poezdov»* [Proceedings of the XVII Scientific and Practical Conference «Train Traffic Safety»]. Moscow, 2016, pp. 96-98.

#### **Информация об авторах**

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

#### **Information about the authors**

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



## Системный анализ технологии энергетического обеспечения тяги поездов

Т.Л. Алексеева<sup>1</sup>✉, Н.Л. Рябченко<sup>1</sup>, Л.А. Астраханцев<sup>1</sup>, В.А. Тихомиров<sup>1</sup>, Н.Л. Михальчук<sup>2</sup>, С.А. Мартусова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Дирекция тяги – филиал ОАО «Российские железные дороги», г. Москва, Российская Федерация

✉talecseeva843@gmail.com

### Резюме

Анализ работы основных силовых агрегатов электрической тяги поездов направлен на совершенствование энергетического обеспечения вождения тяжеловесных и высокоскоростных поездов для повышения пропускной и провозной способности железной дороги. Предложенный системный анализ эффективности электрической тяги основан на применении уточненного закона сохранения энергии в электромагнитном поле, новых энергетических характеристик силовых агрегатов и использовании спектрального анализа напряжения, тока в контурах электрической цепи. Исследованием электрической тяги на постоянном токе высокого напряжения с применением на тяговых преобразовательных подстанциях трехфазных двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа подтвержден высокий уровень показателей качества электрической энергии на вводе. Коэффициент искажения синусоидальности кривой фазного напряжения на первичной обмотке преобразовательного трансформатора равен 0,71 %. Нечетные гармонические составляющие фазного тока в обмотках преобразовательного трансформатора подстанции до 19-й гармоники превышают 1 % от тока первой гармоники, сдвинуты по фазе на углы близкие к 90 или 270 электрических градусов относительно одноименных гармоник фазного напряжения и формируют соответствующие реактивные мощности. С применением вторичных обмоток, соединенных по схеме «треугольник», гармоники фазного тока кратные трем превосходят по величине другие гармонические составляющие тока и способствуют загрузке дополнительным током системы внешнего электроснабжения. Исследованием электрической тяги с применением трехфазных выпрямителей конструкции Иркутского государственного университета путей сообщения показана возможность снизить на 4,4 % потребление активной мощности из системы внешнего электроснабжения. Коэффициент искажения синусоидальности кривой фазного напряжения на первичной обмотке преобразовательного трансформатора составляет 0,6 %. В качестве нагрузки тяговых преобразовательных подстанций, расположенных на расстоянии 50 км, применена тяга трех соединенных поездов суммарной массой 22 500 т со скоростью 50 км/ч в середине межподстанционной зоны. Загрузка контактной подвески током не более 947,5 А позволяет не изменять сечение токоведущих проводов контактной подвески, которая в основном применяется в контактной сети переменного тока напряжением 25 кВ, 50 Гц. Коэффициент полезного действия электрической тяги поездов повышается на 3,5 % по сравнению с тягой двенадцатипульсовыми выпрямителями напряжением 37,1 кВ.

### Ключевые слова

технология энергетического обеспечения, трехфазный двенадцатипульсовый выпрямитель, преобразовательный трансформатор, спектральный анализ, гармонические составляющие, фазное напряжение, ток, электрическая тяга поезда

### Для цитирования

Системный анализ технологии энергетического обеспечения тяги поездов / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев, В.А. Тихомиров, Н.Л. Михальчук, С.А. Мартусова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 80–90. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).80-90.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 19.05.2022 г.; поступила после рецензирования: 28.05.2022 г.; принята к публикации: 30.05.2022 г.

## System analysis of the technology of energy supply of train traction

T.L. Alekseeva<sup>1</sup>✉, N.L. Ryabchenok<sup>1</sup>, L.A. Astrakhanchev<sup>1</sup>, V.A. Tikhomirov<sup>1</sup>, N.L. Mikhal'chuk<sup>2</sup>, S.A. Martusova<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Traction Directorate – Branch of JSC «Russian Railways», Moscow, the Russian Federation

✉talecseeva843@gmail.com

### Abstract

The analysis of the main power units operation of electric traction of trains is aimed at improving the energy supply for heavy and high-speed trains driving to increase the throughput and carrying capacity of the railway. The proposed system analysis of the electric traction efficiency is based on the application of an amended law of conservation of energy in an electromagnetic field. It is also based on new energy characteristics of power units and the use of spectral analysis of voltage and current in the outlines of an electrical circuit. A study of high-voltage DC electric traction was carried out with the use of three-phase twelve-pulse serial rectifiers at traction converter substations. This study confirmed the high level of electrical energy quality indicators

at the input. The coefficient of distortion for the sinusoidal curve of the phase voltage on the primary winding of the converter transformer is 0.71%. The odd harmonic components of the phase current in the windings of the substation transformer up to the nineteenth harmonic exceed 1% of the current of the first harmonic. They are shifted in phase by angles close to 90 or 270 electric degrees relative to the eponymous phase voltage harmonics and form the corresponding reactive power. If secondary windings connected according to the "triangle" scheme are used, then phase current harmonics multiple of three exceed the other harmonic components of the current in magnitude and contribute to the additional current loading of the external power supply system. In the study of electric traction using three-phase rectifiers designed in the Irkutsk State Transport University, the possibility was shown to reduce the consumption by 4.4% of active power from the external power supply system. The coefficient of distortion in the phase voltage sinusoidal curve on the primary winding of the converter transformer is 0.6%. As a load of traction converter substations located at a distance of 50 km, the traction of three connected trains with a total mass of 22,500 tons at a speed of 50 km/h in the middle of the inter-substation zone was used. Loading the contact suspension with a current of no more than 947.5 A allows not to change the cross-section of the current-carrying wires of the contact suspension, which is mainly used in the AC contact network with a voltage of 25 kV, 50 Hz. The efficiency of electric traction of trains increases by 3.5% as compared to the traction by twelve-pulse rectifiers with a voltage of 37.1 kV.

### Keywords

Energy supply technology, three phase twelve pulse rectifier, converter transformer, spectral analysis, harmonic components, phase voltage, current, electric traction of a train

### For citation

Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Atrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Mikhalyachuk N.L., Martusova S.A. Sistemnyi analiz tekhnologii energeticheskogo obespecheniya tyagi poezdov [System analysis of the technology of energy supply of train traction]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2(74), pp. 80–90. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).80-90.

### Article Info

Received: May 19, 2022; revised: May 28, 2022; accepted: May 30, 2022.

### Введение

Повышение эффективности энергетического обеспечения электрической тяги поездов позволяет реализовать *перспективные приоритетные направления развития холдинга ОАО «РЖД» [1]*. Тяговые подстанции (ТП) железных дорог имеют внешнее электроснабжение трехфазным переменным током напряжением 220, 110 кВ. Тяговое электроснабжение на постоянном токе напряжением 3,3 кВ обеспечивается с помощью трехфазных двенадцатипульсовых пульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) последовательного типа. Тяговое электроснабжение на переменном токе напряжением 27,5 кВ, 50 Гц в основном выполняется с применением на ТП трехфазных трехобмоточных трансформаторов и распределением фаз тяговых вторичных обмоток по фидерным зонам тяговой сети [2–4].

На тяговом электроподвижном составе (ЭПС) постоянного тока напряжением 3 кВ применяются тяговые коллекторные электродвигатели (ТЭД) и асинхронные трехфазные тяговые двигатели (АТД). Для преобразования постоянного тока в частотно-регулируемое переменное трехфазное напряжение на обмотках статора АТД применяются трехфазные автономные инверторы напряжения (АИН) [5, 6]. На ЭПС переменного тока напряжением 25 кВ

для преобразования напряжения и регулирования мощности ТЭД применяются однофазные трансформаторы с секционированной вторичной тяговой обмоткой и 4-х зонный ВИП с импульсно-фазовым управлением [7].

С помощью применяемой технологии энергетического обеспечения тяги поездов можно незначительно увеличить пропускную и провозную способность железной дороги за счет интенсивного износа оборудования энергетических предприятий, ЭПС, рельсов и завышенного расхода электрической энергии на транспортные работы.

Решение задач стратегического развития отрасли с сохранением работоспособности техники, с обеспечением энергосбережения и грамотного взаимодействия с окружающей природной средой возможно благодаря применению результатов современных научных разработок, новых изоляционных и магнитотвердых материалов, повышенной частоты напряжения и тока, современной полупроводниковой техники и нанотехнологий. Ключевую роль в эффективном энергетическом обеспечении тяги поездов выполняет совершенствование инженерного образовательного процесса в учебных учреждениях и повышение компетенции специалистов отрасли [8, 9]. Новая технология энергетического обеспечения транспортных

работ, максимальное использование богатого опыта разработки, изготовление и эксплуатация оборудования, которое применяется в настоящее время, способствуют снижению материальных, финансовых затрат и исключению ошибок в ходе кардинального изменения ситуации в отрасли.

### Теоретическое обоснование

Известным балансом мощностей (1) на входе полупроводниковых преобразователей [10–12], специалисты ориентированы на разработку технических решений для устранения мощности искажения и компенсации мощности сдвига:

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + T^2}, \quad (1)$$

где  $S$  – полная мощность на входе полупроводникового преобразователя;  $P_1$  – активная мощность основной гармоники напряжения и первой гармоники тока на входе полупроводникового преобразователя;  $Q_1$  – мощность сдвига (реактивная) основной гармоники напряжения и первой гармоники тока на входе полупроводникового преобразователя;  $T$  – мощность искажения (реактивная) основной гармоники напряжения и высших гармоник тока (кроме первой гармоники тока) на входе полупроводникового преобразователя.

В настоящее время подготовка будущих профессионалов в области разработки, изготовления и эксплуатации оборудования для электрической тяги ориентирована на устранение последствий неудовлетворительной работы оборудования (1).

В применяемой технологии энергообеспечения тяги поездов (рис. 1) трехфазные пятиобмоточные трансформаторы с трехфазными двенадцатипульсовыми выпрямителями приближают форму кривой тока в первичных обмотках преобразовательных трансформаторов  $T_3$ ,  $T_4$  и на вводе тяговых преобразовательных подстанций (ТПП), близкой к синусоидальной. В первичной обмотке трехфазного преобразовательного трансформатора с двенадцатипульсовым выпрямителем последовательного типа кривая линейного тока смещена по фазе относительно линейного напряжения на угол из-за мощности намагничивания тягового трансформатора и смещения по фазе тока тиристорами выпрямителя при импульсно-фазовом управлении.

Технический и технологический прогресс возможен, если специалисты компетентны видеть и устранять причины, которые сдерживают дальнейшее совершенствование технических решений. Теоремой Умова – Пойнтинга учтено сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической

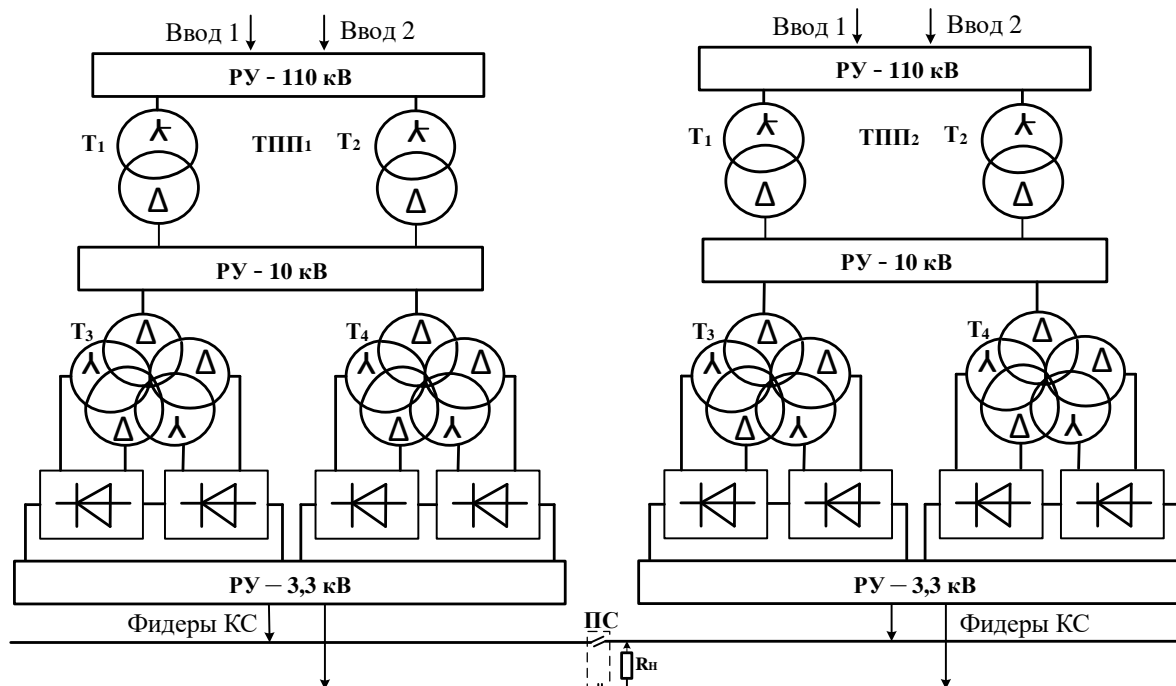


Рис. 1. Структурная схема энергетического обеспечения тяги поездов

Fig. 1. Structural diagram of the power supply of train traction

энергии в иной вид энергии из-за процесса энергообмена между источником энергии и реактивными элементами электрической цепи. Аналитически доказано ранее [13–15], что в процессе энергообмена часть напряжения генератора электрической энергии не используется для необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии. В предложенном балансе мощностей (2) в отличие от известного (1) учитывается сокращение времени необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии не только реактивными элементами, но и регуляторами мощности:

$$\sqrt{S^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (2)$$

где  $P$  – активная мощность учитываемых составляющих ряда Фурье напряжения и одноименных составляющих ряда Фурье тока на входе полупроводникового преобразователя;  $Q$  – реактивная мощность учитываемых составляющих ряда Фурье напряжения и одноименных составляющих ряда Фурье тока на входе полупроводникового преобразователя;  $\Delta S$  – часть полной мощности  $S$  на входе полупроводникового преобразователя с нагрузкой, учитывающая сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии силовыми полупроводниковыми приборами (СПП) преобразователя [16, 17].

С помощью предложенных энергетических характеристик выявлена причина снижения эффективности и электромагнитной совместимости элементов электроэнергетической системы железной дороги. Из-за коммутационных процессов в полупроводниковых преобразователях и непроводящего состояния СПП сокращается продолжительность использования напряжения системы электроснабжения для тяги поездов. Во время непроводящего состояния и коммутации тока в СПП полупроводникового преобразователя ЭПС напряжение на токоприемнике ЭПС не используется для тяги поезда, а из контактной сети ЭПС потребляет завышенный ток [18].

Полная мощность на входе преобразователя ЭПС с нагрузкой (3) рассчитывается по формуле:

$$S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U \cdot I, \quad (3)$$

где  $U_k$  – действующее напряжение  $k$ -й составляющей ряда Фурье на входе преобразователя;  $I_k$  – действующий ток  $k$ -й составляющей ряда Фурье на входе преобразователя;  $U$  – действующее напряжение на входе преобразователя;  $I$  – действующий ток на входе преобразователя;  $k$  – номер составляющей ряда Фурье;  $n$  – номер последней из учитываемых гармоник.

Активную мощность (4) на входе преобразователя предложено рассчитывать по формуле:

$$P = U_{co} \cdot I_0 + \sum_{k=0}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k, \quad (4)$$

где  $U_{co}$  – постоянная составляющая напряжения на входе преобразователя во время проводящего состояния СПП;  $I_0$  – постоянная составляющая тока на входе преобразователя;  $U_{ck}$  – действующее напряжение  $k$ -й гармоники на входе преобразователя во время проводящего состояния СПП;  $\varphi_k$  – угол сдвига по фазе тока  $k$ -й гармоники относительно одноименной гармоники напряжения.

Так как реактивная мощность  $Q$  характеризует интенсивность энергообмена между реактивными элементами электрической цепи и источником энергии [13], то данная составляющая полной мощности формируется одноименными гармониками напряжения и тока на входе преобразователя с нагрузкой (5):

$$Q = \pm \sqrt{\sum_{k=1}^n U_{ck}^2 \cdot I_k^2 \cdot \sin^2 \varphi_k}. \quad (5)$$

Частью полной мощности на входе полупроводникового преобразователя с нагрузкой  $\Delta S$  (6) учитывается сокращение длительности использования напряжения на входе преобразователя для выполнения работы электрической энергией:

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{pk}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U_p \cdot I, \quad (6)$$

где  $U_{pk}$  – действующее напряжение  $k$ -й гармоники на входе преобразователя с нагрузкой во время непроводящего состояния или коммутации тока СПП;  $U_p$  – действующее напряжение на входе преобразователя с нагрузкой во время непроводящего состояния (паузы) или коммутации тока СПП преобразователя.

## Метод и результаты исследования

С помощью предложенного баланса мощностей (2) можно аналитически выявить причи-

ну неудовлетворительной работы оборудования и перспективные направления совершенствования технологии энергетического обеспечения работы электрического транспорта:

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

$$\sqrt{U^2 \cdot I^2 - U_p^2 \cdot I^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{U^2 - U_p^2}}. \quad (7)$$

Тиристорами в преобразовательных агрегатах (см. рис. 1) при введении угла регулирования увеличивается  $U_p$ , поэтому действующий ток  $I$  в силовых агрегатах и на вводе ТПП (7) увеличивается. Для снижения тока вместо известных регуляторов напряжения лучше применять регуляторы сопротивления. Так как пропускную и провозную способность железной дороги необходимо увеличивать, то возрастает  $P$  и  $I$  (7). Потери активной мощности во всех силовых агрегатах электрической тяги возрастают пропорционально квадрату тока. Следовательно, с увеличением объемов работы, выполняемой с помощью электрической энергии, необходимо повышать напряжение  $U$  (7) для того, чтобы коэффициент полезного действия (КПД) не снижался.

Целесообразность повышения напряжения в контурах электрической тяги поездов (рис. 2) можно рассмотреть, применив разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения (ИрГУПС) регуляторы мощности ЭПС [17, 18].

Для модернизации ТПП потребуется разрабатывать и изготавливать трехфазные трехобмоточные преобразовательные трансформаторы  $T_1, T_2$  с вторичными обмотками, соединенными по схеме «звезда» и по схеме «треугольник» с линейным напряжением 27,5 кВ. Выпрямленное напряжение 37,1 кВ с трехфазного двенадцатипульсового выпрямителя последовательного типа подается на шины распределительного устройства (РУ) и затем – в контактную сеть. В данном проекте можно использовать токоведущие части контактной подвески ПБСМ-95, МФ-100, А-195, которая применяется в настоящее время для электрической тяги на переменном токе напряжением 25 кВ, 50 Гц. Расстояние между ТПП при расчетах принято 50 км. Для ЭПС с номинальным напряжением ТЭД 1 000 – 1 500 В нужно разработать и изготовить входной преобразователь с регулятором мощности для согласования напряжения в контактной сети с напряжением ТЭД и плавного регулирования мощности ЭПС за счет плавного изменения его входного электрического сопротивления.

Исследования и оценка электромагнитных, энергетических процессов в системе электрической тяги на постоянном токе напряжением 37,1 кВ выполнены с использованием предложенной теории (1–7), математического моделирования в среде Simulink программы Matlab (рис. 3) и спектрального FFT-анализа (вариант 1).

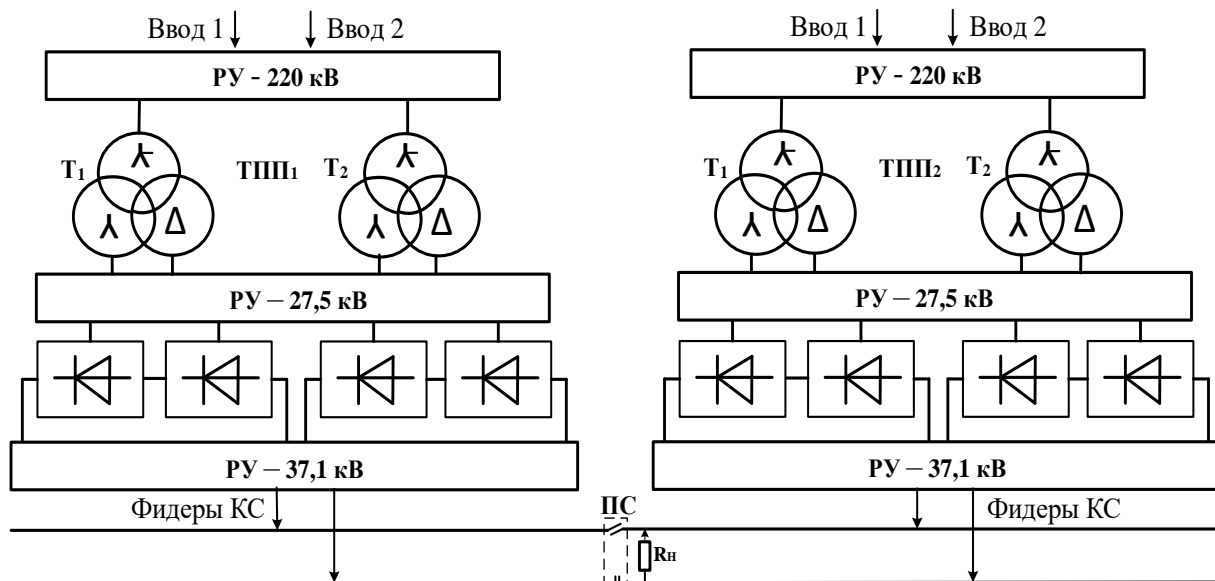


Рис. 2. Структурная схема энергетического обеспечения тяги поездов повышенным напряжением

Fig. 2. Block diagram of the power supply of train traction with increased voltage

Осциллограммы фазного напряжения и тока на вводе ТПП (рис. 4) получены с помощью осциллографа ASM. Блоком «powerqui»

выполняется обработка результатов измерения электрических величин, FFT- анализ и оценка нелинейных искажений (рис. 5).

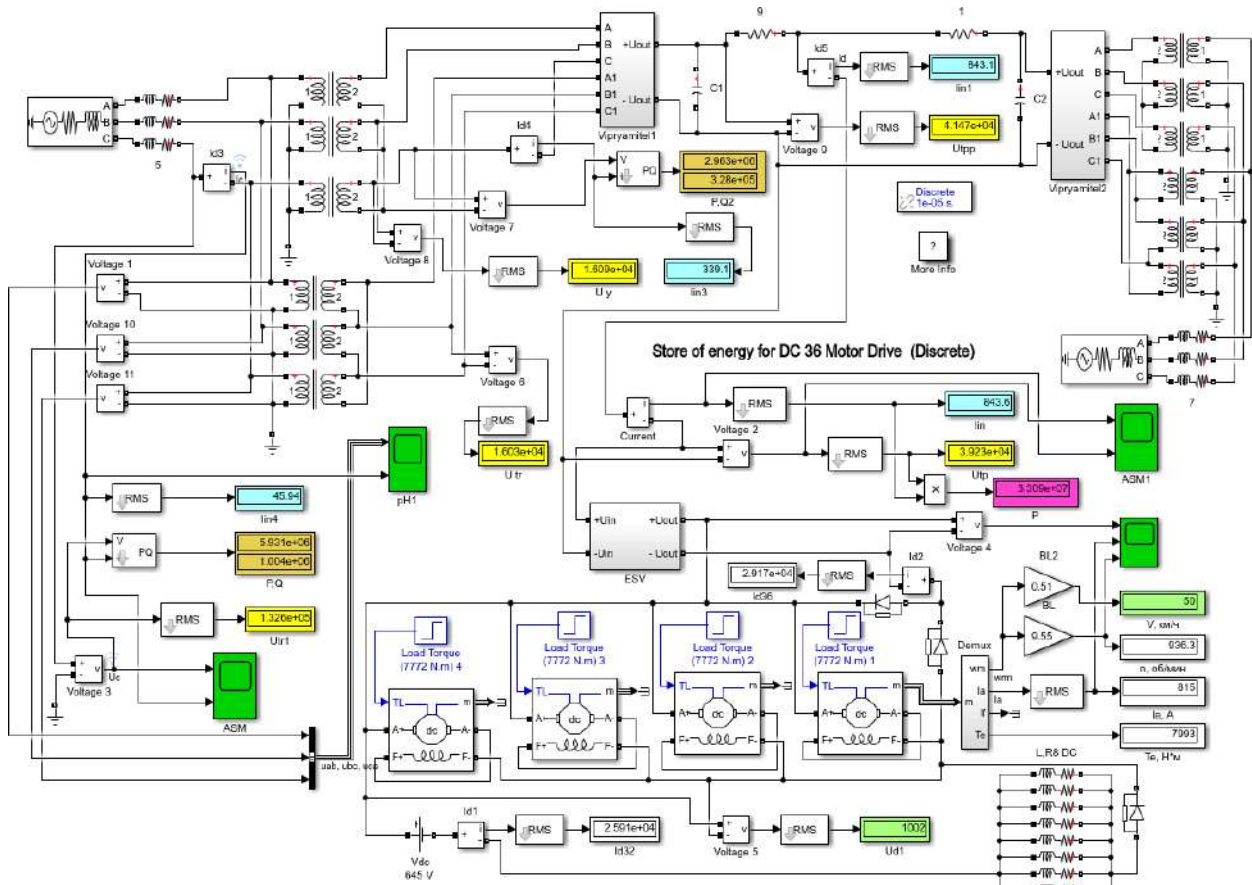


Рис. 3. Математическая модель системы энергетического обеспечения трех соединенных поездов суммарной массой 22 500 т и скоростью 50 км/ч с применением трехфазного двенадцатипульсового выпрямителя

Fig. 3. Mathematical model of the power supply system of three connected trains with a total mass of 22 500 tons and a speed of 50 km/h using a three-phase twelve-pulse rectifier

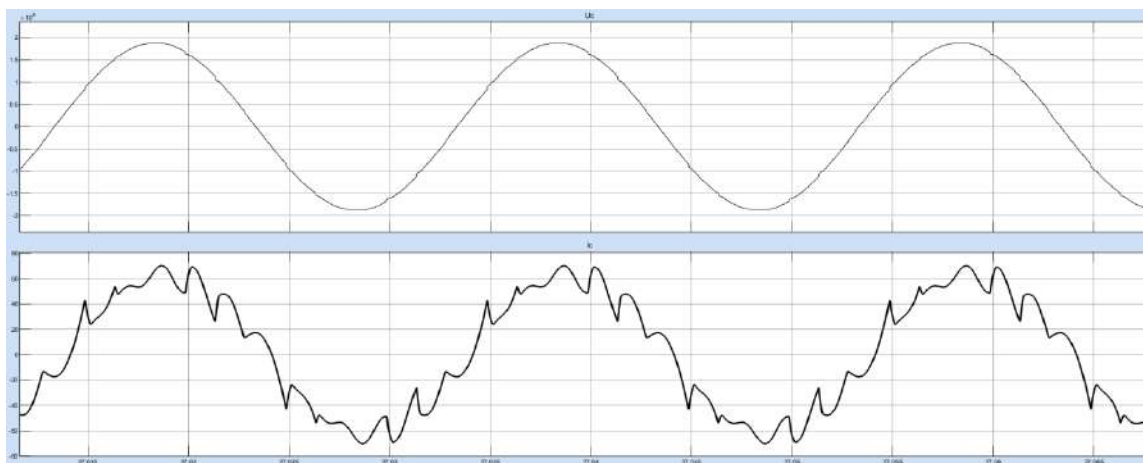


Рис. 4. Осциллограммы фазного напряжения и тока в первичной обмотке тягового преобразовательного трансформатора

Fig. 4. Oscillograms of phase voltage and current in the primary winding of the traction converter transformer

В спектре нечетных высших гармоник выделяются 11 и 13 гармоники. Остальные гармоники фазного тока на вводе ТПП не превышают 5 % от тока первой гармоники. Угол сдвига по фазе одноименных высших гармоник фазного тока относительно одноименных гармоник фазного напряжения находится в пределах 90–270 электрических градусов, что свидетельствует о реактивной мощности высших гармонических составляющих. Результаты анализа сведены в табл. 1.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой переменного фазного напряжения (ТНД) на первичной обмотке преобразовательного трансформатора составляет 0,71 %, а коэффициент искажения синусоидальности кривой переменного фазного тока в первичной обмотке преобразовательного трансформатора

составляет 16,16 %.

В ИрГУПСе разработан способ преобразования трехфазного напряжения в выпрямленное напряжение с возможностью применения трехфазных тяговых трансформаторов ТДТНЖ-40000-220-81 с линейным напряжением вторичных тяговых обмоток  $U_2 = 27,5$  кВ, которые широко применяются на ТП железных дорог для электрической тяги на переменном токе 25 кВ, 50 Гц (вариант 2).

Одинаковые условия внешнего, тягового электроснабжения и нагрузки предложенного трехфазного выпрямителя в процессе электрической тяги трех соединенных поездов (рис. 6) позволяют сравнить эффективность исследованных технологий энергетического обеспечения вождения грузовых поездов.

При одинаковом объеме выполняемой

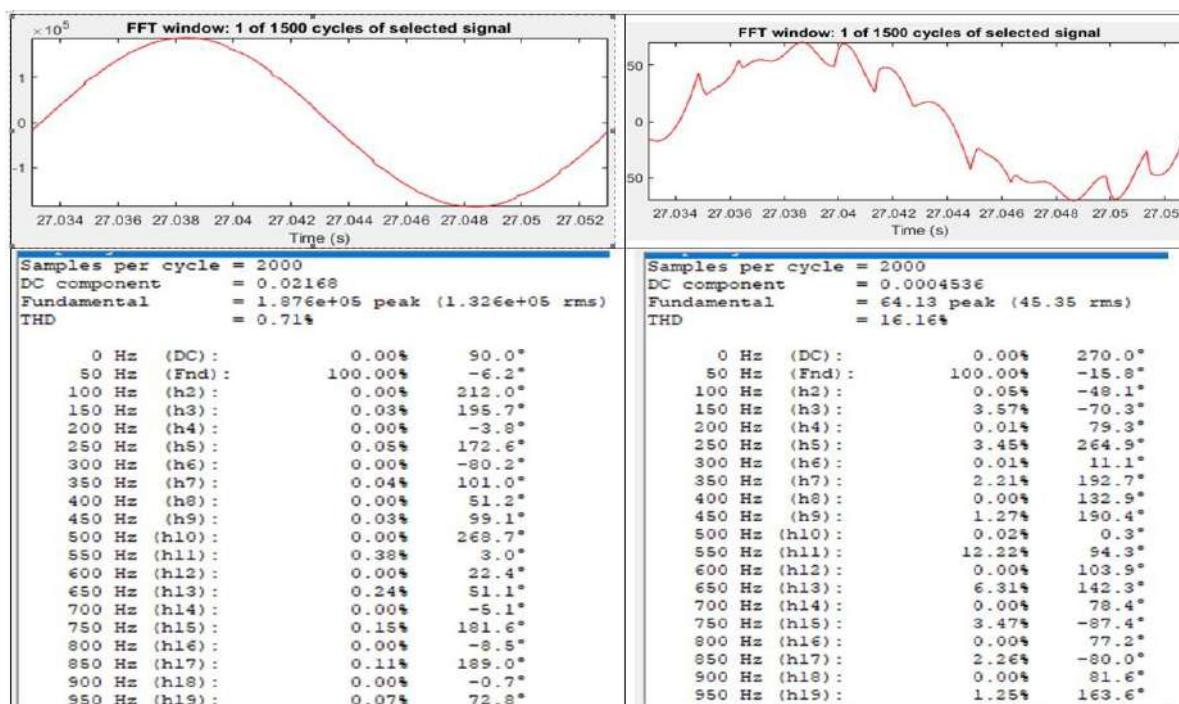


Рис. 5. Результаты FFT-анализа фазного напряжения и тока в первичной обмотке тягового трансформатора 40 МВА

Fig. 5. Results of FFT analysis of phase voltage and current in the primary winding of a 40 MVA traction transformer

Таблица 1. Гармонические составляющие фазного напряжения  $U_F$ , фазного тока  $I_F$  на вводе тяговых преобразовательных подстанций с трехфазным двенадцатипульсовым выпрямителем

Table 1. Harmonic components of the phase voltage  $U_F$  and phase current  $I_F$  at the input of traction converter substations with a three-phase twelve-pulse rectifier

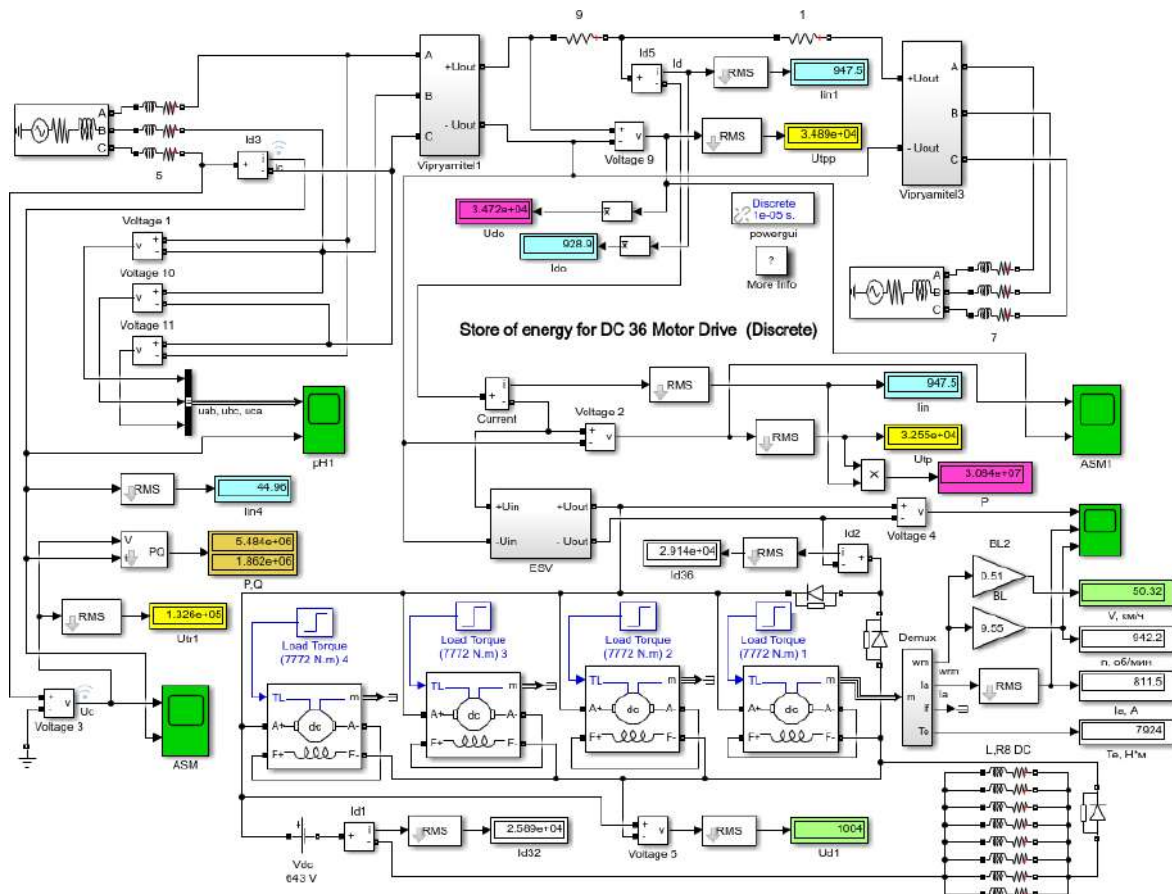
Показатель	Гармоника									
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$U_F$ , В	132 700	39,8	66,3	53,1	39,8	504,3	318,5	199,1	146	92,8
$I_F$ , А	45,35	3,2	2,6	1,4	0,68	2,7	2,2	0,98	1,2	0,57

транспортной работы действующий фазный ток на вводе в ТПП составляет 44,96 А и снизился на 1 А по сравнению с током в ранее рассмотренной системе (вариант 1). Активная мощность одной фазы на вводе в ТПП 5484 кВт уменьшилась на 7,5 % по сравнению с активной мощностью в варианте 1, поэтому КПД электрической тяги повышается.

В спектре нечетных высших гармоник выделяются 5, 7, 17 и 19 гармоники. Остальные гармоники фазного тока не превышают 5 % от

тока первой гармоники. Угол сдвига по фазе одноименных высших гармоник фазного тока относительно одноименных гармоник фазного напряжения находится в пределах 90–270 электрических градусов, т. е. высшие гармоники напряжения и тока формируют реактивную мощность. Результаты анализа сведены в табл. 3.

Увеличенная активная мощность  $P$  в составе полной мощности на входе системы обеспечения движения (СОД) с трехфазным двенадцатипульсовым выпрямителем (вариант 1) по



**Рис. 6.** Математическая модель системы энергетического обеспечения трех соединенных поездов суммарной массой 22 500 тонн и скоростью 50 км/ч с применением трехфазного выпрямителя конструкции Иркутского государственного университета путей сообщения

**Fig. 6.** Mathematical model of the energy supply system of three connected trains with a total mass of 22 500 tons and a speed of 50 km/h using a three-phase rectifier designed in the Irkutsk State Transport University

**Таблица 2.** Гармонические составляющие фазного напряжения  $U_{\Phi}$ , фазного тока  $I_{\Phi}$  на вводе тяговых преобразовательных подстанций с трехфазным выпрямителем конструкции Иркутского государственного университета путей сообщения

**Table 2.** Harmonic components of the phase voltage  $U_F$  and phase current  $I_F$  at the input of the traction converter substations with a three-phase rectifier design the Irkutsk State Transport University

Гармоника	Гармоника								
	1	5	7	9	11	13	15	17	19
$U_{\Phi}$ , В	132600	371,3	172,4	39,8	172,4	92,8	26,5	464,1	146
$I_{\Phi}$ , А	41,54	8,8	2,9	0,44	1,88	0,9	2,2	3,2	2,2



Таблица 3. Результаты анализа показателей технологий энергетического обеспечения тяги поездов

Table 3. The results of the analysis of the technology indicators for energy supply of train traction

№	Параметры системы обеспечения движения	Вариант 1	Вариант 2
1	Полная мощность на входе ТПП1, ТПП2, МВА	35,07	35,77
2	Активная мощность на входе ТПП1, ТПП2, Р, МВт	34,41	32,90
3	Коэффициент мощности электрической тяги	0,98	0,92
4	Коэффициент полезного действия выпрямительного агрегата, %	99,2	99,0
5	Напряжение на выходе выпрямительного агрегата, кВ	41,47	34,89
6	Ток в токоприемнике электроподвижного состава, А	816,0	947,5
7	Потери активной мощности в контактной сети, МВт	1,665	2,157
8	Коэффициент полезного действия контактной сети, %	95,1	93,3
9	Коэффициент полезного действия входного преобразователя (ESV) электроподвижного состава, %	90,10	96,27
10	Суммарный ток в обмотке якоря 36-и тягового электродвигателя НБ-514Б, кА	29,24	29,14
11	Скорость движения поезда, км/ч	50	50
12	Суммарная мощность на валу 36-и тягового электродвигателя Р <sub>в</sub> , МВт	27,6	27,6
13	Коэффициент полезного действия тягового электродвигателя НБ-514Б, %	94,35	94,35
14	Коэффициент полезного действия электрической тяги поезда $\eta_{ЭТ} = (P_B / P) \cdot 100\%$	80,2	83,9
15	Коэффициент искажения синусоидальности $U_{\phi}$ , %	0,71	0,60
16	Коэффициент искажения синусоидальности $I_{\phi}$ , %	16,16	24,95

сравнению с СОД с трехфазным выпрямителем ИрГУПС (вариант 2) свидетельствует о неоправданных потерях электрической энергии в преобразовательных трансформаторах при коротких замыканиях вторичных обмоток тиристорами мостовых выпрямителей во время коммутации тока с одного плеча на другое плечо. Контрпродуктивно повышать коэффициент мощности устройств за счет увеличения потерь активной мощности в составе полной мощности. В контуре выпрямленного тока напряжение на выходе трехфазного двенадцатипульсового выпрямителя больше, чем напряжение в варианте 2, поэтому в варианте 1 контактная сеть загружается меньшим током (7). В варианте 1 потери активной мощности в контактной сети меньше, чем в варианте 2, поэтому КПД контактной сети в варианте 1 выше на 1,8 % КПД контактной сети в варианте 2.

Конструкция электрического полупроводникового вариатора (ESV) в рассмотренных вариантах одинакова, но объем его работы в варианте 1 по согласованию напряжения в контактной сети с напряжением на обмотках ТЭД ЭПС больше чем в варианте 2, поэтому КПД ESV в варианте 2 выше на 6,17 %. Из-за напряжения на обмотках ТЭД ЭПС 1000 В в контурах 36 ТЭД протекает суммарный ток 29 000 А (7) для того, чтобы обеспечить тягу соединенных

трех поездов суммарной массой 22 500 тонн со скоростью 50 км/ч.

Конструкция регулятора мощности ТЭД в составе блока ESV подробно рассмотрена в работах [17]. Импульсная форма напряжения, прикладываемая к обмоткам ТЭД с частотой повторения, которая обеспечивает практически постоянный ток (коэффициент пульсаций тока в обмотках не более 2 %) в контуре, охваченном обратным диодом. В контуре во время паузы между импульсами напряжения протекает ток за счет энергии магнитного поля ТЭД, которая накапливается во время импульсов напряжения. Достаточно высокий КПД ТЭД достигается без применения сглаживающих реакторов.

Коэффициенты искажения кривой синусоидальности напряжения в трехфазной сети на вводе ТПП менее 1 % позволяют рекомендовать в трехфазных преобразовательных трансформаторах установку вторичной обмотки для энергоснабжения нетяговых потребителей электрической энергии.

### Заключение

Системным анализом электромагнитных и энергетических процессов в силовых контурах электрической тяги поезда доказана целесообразность разработки технических решений, которыми достигается полное и непрерывное использование электрического потенциала для

выполнения работы на транспорте. КПД электрической тяги поезда повышается на 3,5 % с увеличением массы поезда в 3 раза и повышением скорости движения на 4,4 %. С применением трехфазного выпрямителя ИрГУПС конструкция преобразовательных трансформаторов

на ТПП упрощается, а спектральным анализом напряжения и тока доказана возможность применения на ТПП железных дорог трансформаторов, которые изготавливаются для электрообеспечения предприятий и городов.

### Список литературы

1. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. М. : М-во образования и науки РФ, 2014. 244 с.
2. Чернов Ю.А. Электроснабжение железных дорог. М. : УМЦ ЖДТ, 2016. 406 с.
3. Аржанников Б.А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. 207 с.
4. Салита Е.Ю., Ковалева Т.В., Комякова Т.В. Обоснование внедрения двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа в системе электроснабжения метрополитена // Изв. Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 11–20.
5. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. Т. 2. 307 с.
6. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов / Ю.А. Бахвалов, Г.А. Бузало, А.А. Зарифьян и др. М. : Маршрут, 2006. 374 с.
7. Преобразователь выпрямительно-инверторный ВИП-1000-У1 : руководство по эксплуатации ИЕАЛ.435411.046 РЭ. Саранск : Электровыпрямитель, 2008. 35 с.
8. Francesco V., Luigi I. Dynamic and Control of Switched Electronic Systems // Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters. London : Springer, 2012. 492 p.
9. Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л., Астраханцев Л.А. Новые возможности повышения эффективности образовательного процесса в учебных заведениях высшего образования // Современные проблемы профессионального образования: опыт и пути решения : материалы III всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2018. С. 837–842.
10. Маевский О.А. Энергетические характеристики вентильных преобразователей. М. : Энергия, 1978. 320 с.
11. Akagi H., Watanabe E., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. The power engineering: Handbook. New York : Wiley, 2007. 379 p.
12. Хохлов Ю.И., Сафонов В.И., Лонзингер П.В. Внешние и энергетические характеристики двенадцатифазных компенсированных выпрямителей с векторным управлением // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. 2014. Вып. 4. № 14. С. 37–45.
13. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1884. № 175. P. 343–361. doi.org/10.1098/rstl.1884.0016.
14. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. СПб. : Питер, 2009. Т. 2. 431 с.
15. Афанасьев Б.П., Гольдин О.Е., Кляцкин И.Г. Теория линейных электрических цепей. М. : Высш. шк., 1973. 592 с.
16. Уточненный закон сохранения энергии / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, К.П. Якобчук и др. : Rusnauka : сайт. URL: [http://www.rusnauka.com/42\\_PRNT\\_2015/Tecnic/5\\_202603.doc.htm](http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm) (Дата обращения: 01.04.2022).
17. Энергетическая эффективность в электрических цепях с полупроводниковыми приборами / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев и др. // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20. № 2. С. 89–98. DOI: 10.14529/power200208.
18. Инновационные перспективы тягового электроподвижного состава / А.В. Воротилкин, Н.Л. Михальчук, Н.Л. Рябченко и др. // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 6. С. 62–76.

### References

1. Prognoz nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda [Forecast of scientific and technological development of the Russian Federation for the period up to 2030]. Moscow: Ministerstvo obrazovaniya i nauki RF Publ., 2014. 244 p.
2. Chernov Yu.A. Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog [Railway power supply]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 216. 406 p.
3. Arzhannikov B.A. Tyagovoe elektrosnabzhenie postoyannogo toka skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya poezdov [Traction DC power supply for high-speed and heavy-duty train traffic]. Yekaterinburg: UrGUPS Publ., 2012. 207 p.
4. Salita E.Yu., Kovaleva T.V., Komyakova T.V. Obosnovanie vnedreniya dvenadtsatipul'sovykh vypryamitelei posledovatel'nogo tipa v sisteme elektrosnabzheniya metropolitena [Justification of the introduction of twelve-pulse rectifiers of serial type in the metro power supply system]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2020, no.1(41), pp. 11–20.
5. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and Converter Technology]. Moscow; UMTS ZHDT Publ. Vol. 2. 2015. 307 p.
6. Bakhvalov Yu.A., Buzalo G.A., Zarif'yan A.A., Petrov P.Yu. Dinamicheskie protsessy v asinkhronnom tyagovom privode magistral'nykh elektrovozov [Dynamic processes in asynchronous traction drive of mainline electric locomotives]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 374 p.
7. Preobrazovatel' vypryamitel'no-invertornyi VIP-1000-U1: Rukovodstvo po ekspluatatsii IEAL.435411.046 [Rectifier-inverter VIP-1000-U1 converter: Operating Manual IEAL.435411.046 RE]. Saransk: Elektrovypryamitel' Publ., 2008. 35 p.

8. Francesco V., Luigi I. Dynamic and Control of Switched Electronic Systems. Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters / Springer. 2012. 492 p.
9. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A. Novye vozmozhnosti povysheniya effektivnosti obrazovatel'nogo protsessa v uchebnykh zavedeniyakh vysshego obrazovaniya [New Opportunities to Increase the Efficiency of the Educational Process in Educational Institutions of Higher Education]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennye problemy professional'nogo obrazovaniya: opyt i puti resheniya»* [Proceedings of III All-Russian Scientific and Practical Conferences with International Participation «Modern problems of vocational education: experience and solutions»]. Irkutsk, 2018, pp. 431–434.
10. Maevskii O.A. Energeticheskie kharakteristiki ventil'nykh preobrazovatelei [Energy Characteristics of Valve Converters]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 320 p.
11. Akagi H., Watanabe E., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. The power engineering: Handbook. New York: Wiley, 2007. 379 p.
12. Khokhlov Yu.I., Safonov V.I., Lonzing P.V. Vneshnie i energeticheskie kharakteristiki dvenadtsatfaznykh kompensirovannykh vypryamiteley s vektornym upravleniem [External and Energy Characteristics of Twelve-phase Compensated Vector-controlled Rectifiers]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Energetika»* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2014, vol. 4, no. 14, pp. 37–45.
13. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field / Philosophical Transactions of the Royal Society. London: 175, 1884. Pp. 343–361.
14. Demirchan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical Bases of an Electrical Engineering]. St. Petersburg: Piter Publ., 2009, vol. 2, 431 p.
15. Afanas'ev B.P., Gol'din O.E., Klyatskin I.G. Teoriya lineinykh elektricheskikh tsepei [Linear Electrical Circuit Theory]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1973. 592 p.
16. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Yakobchuk K.P., Astrakhantsev L.A. Utochnnnyi zakon sokhraneniya energii (Elektronnyi resurs) [Refined law of conservation of energy (Electronic resource)]. Available at: [http://www.rusnauka.com/42\\_PRNT\\_2015/Tecnic/5\\_202603.doc.htm](http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm) (Accessed April 1, 2022).
17. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' v elektricheskikh tsepyakh s poluprovodnikovymi priborami [Energy Efficiency of Electrical Circuits Carrying Semiconductor Devices]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Energetika»* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering] 2020, vol. 20, no. 2, pp. 89–98. DOI: 10.14529/power200208.
18. Vorotilkin A.V., Mihal'chuk N.L., Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L. Innovatsionnye perspektivy tyagovogo elektropodvizhnogo sostava [Innovative perspectives of traction electric rolling stock]. *Mir transporta* [World of transport], 2015, vol. 13, no. 6, pp. 62–76.

### Информация об авторах

**Алексева Татьяна Леонидовна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [talecseeva843@gmail.com](mailto:talecseeva843@gmail.com).

**Рябченко Наталья Леонидовна**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [astranal@mail.ru](mailto:astranal@mail.ru).

**Астраханцев Леонид Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [astrahancev1943@mail.ru](mailto:astrahancev1943@mail.ru).

**Тихомиров Владимир Александрович**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [svat\\_jirk@mail.ru](mailto:svat_jirk@mail.ru).

**Михальчук Николай Львович**, канд. техн. наук, заместитель начальника дирекции тяги по развитию, дирекция тяги – филиал ОАО «РЖД», г. Москва; e-mail: [zt.esrr@yandex.ru](mailto:zt.esrr@yandex.ru).

**Мартусова Светлана Алексеевна**, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [aleksey.martusov@yandex.ru](mailto:aleksey.martusov@yandex.ru).

### Information about the authors

**Tatyana L. Alekseeva**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [talecseeva843@gmail.com](mailto:talecseeva843@gmail.com).

**Natalya L. Ryabchenok**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [astranal@mail.ru](mailto:astranal@mail.ru).

**Leonid A. Astrakhantsev**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [astrahancev1943@mail.ru](mailto:astrahancev1943@mail.ru).

**Vladimir A. Tikhomirov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [svat\\_jirk@mail.ru](mailto:svat_jirk@mail.ru).

**Nikolai L. Mihal'chuk**, Ph.D. in Engineering Science, Deputy Head of the Traction Directorate for Development, Traction Directorate – Branch of JSC «Russian Railways», Moscow; e-mail: [zt.esrr@yandex.ru](mailto:zt.esrr@yandex.ru).

**Svetlana A. Martusova**, Ph.D. student of the Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [aleksey.martusov@yandex.ru](mailto:aleksey.martusov@yandex.ru).

## Анализ факторов, влияющих на коэффициент трения тормозной колодки подвижного состава

А.А. Корсун, П.Ю. Иванов✉, Д.В. Осипов, Д.А. Тихонов

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

✉savl.ivanov@mail.ru

### Резюме

На сегодняшний день одним из ограничивающих факторов в увеличении участковой и максимальной скоростей движения поездов, которые напрямую влияют на прибыль железнодорожной компании, является тормозная эффективность. Колодка в тормозной системе – первый непосредственный элемент, образующий трение на поверхности катания вращающегося колеса, а тормозная рычажная передача и тормозные цилиндры, служат исключительно для обеспечения прижатия тормозной колодки с требуемой силой. При отсутствии тормозных колодок трение неосуществимо, все остальные устройства предназначены непосредственно для управления силой трения в отношении ее величины и времени действия. В образовании тормозной силы большую роль играет коэффициент трения, который также определяет ее величину. В данной статье рассмотрены различные методы определения коэффициента трения, с помощью которых были выявлены зависимости влияния таких факторов, как сила нажатия колодки на колесо, химический состав колодки, ее форма, степень влажности, износ колодки; начальная продолжительность трения, температуры колодки и поверхности катания колеса на величину коэффициента трения. Данными вопросами занимались и отечественные ученые, например, М. Мецков, В.Ф. Егорченко, и иностранные исследователи, наиболее видным представителем из которых является Гальтон. Несмотря на значимый вклад, внесенный учеными, необходимо продолжать исследования в данной области с целью увеличения скоростей движения подвижного состава и связанных с ними других эксплуатационных показателей, что окажет непосредственное влияние на увеличение прибыли компании ОАО «Российские железные дороги» и позволит снизить различные экономические потери.

### Ключевые слова

подвижной состав железных дорог, коэффициент трения колодки о колесо, коэффициент сцепления колеса с рельсом, тормозная эффективность

### Для цитирования

Анализ факторов, влияющих на коэффициент трения тормозной колодки подвижного состава / А.А. Корсун, П.Ю. Иванов, Д.В. Осипов, Д.А. Тихонов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 91–100. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).91-100.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 26.04.2022 г.; поступила после рецензирования: 6.06.2022 г.; принята к публикации: 7.06.2022 г.

## Analysis of factors affecting the brake pad friction coefficient of rolling stock

A.A. Korsun, P.Yu. Ivanov✉, D.V. Osipov, D.A. Tikhonov

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉savl.ivanov@mail.ru

### Abstract

At present one of the limiting factors in increasing the local and maximum train speeds, directly affecting the profit of the railway company, is braking efficiency. The pad in the brake system is the first direct element that forms friction on the rolling surface of the rotating wheel, and the brake lever gear and brake cylinders serve solely to ensure that the brake pad is pressed with the required force. If the brake pads are absent, friction is not feasible and all other devices are designed directly to control the friction force in relation to its magnitude and duration. The coefficient of friction plays an important role in the formation of the braking force, which also determines its magnitude. In this article, various methods for determining the coefficient of friction are considered, consequently revealing the dependences of the influence of such factors as the force of pressing the pad against the wheel, the chemical composition of the pad, the shape of the pad, the degree of moisture of the pad, the wear of the pad, the initial duration of friction, the temperature of the pad and the rolling surface of the wheel on the value of the friction coefficient. These issues were dealt with by both domestic scientists, such as M. Metskov, V.F. Egorchenko, and foreign scientists, with Galton as the most prominent representative. Despite the significant contribution made by the scientists, it is necessary to continue research in this area in order to increase the speed of movement of rolling stock and other related operational indicators, which will directly affect the increase in profits of JSC "Russian Railways" and reduce various economic losses.

**Keywords**

rolling stock of railways, the coefficient of friction of the pad on the wheel, the coefficient of adhesion of the wheel with the rail, braking efficiency

**For citation**

Korsun A.A., Ivanov P.Yu., Osipov D.V., Tikhonov D.A. Analiz faktorov, vliyayushchikh na koeffitsient treniya tormoznoi kolodki podvizhnogo sostava [Analysis of factors affecting the brake pad friction coefficient of rolling stock]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 91–100.– DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).91-100.

**Article info**

Received: April 26, 2022; revised: June 6, 2022; accepted: June 7, 2022.

**Введение**

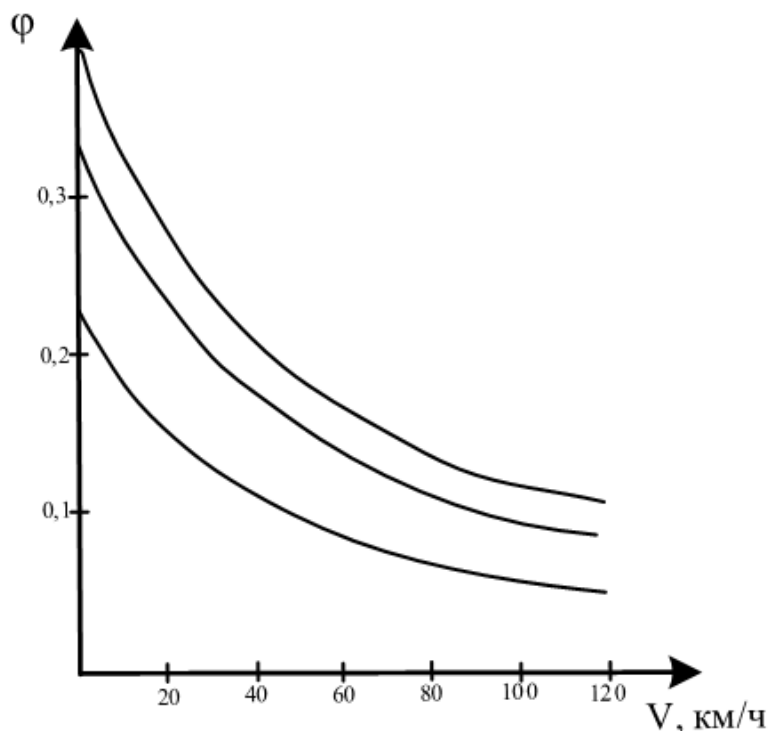
На первый взгляд, природа трения и его законы так просты и общеизвестны, что о них едва можно сказать больше, чем есть в курсах физики или теоретической и прикладной механики. Однако теория трения до сих пор не разработана и при попытках построить различные гипотезы авторы вступают в противоречия между собой.

В статье проведен анализ работ предшественников касательно факторов, влияющих на динамику изменения коэффициента трения. К сожалению, фундаментальные наработки по этому вопросу осуществлялись только в XIX–XX вв. В данном разделе приведены основные тезисы [1].

**Исследования Гальтона о влиянии изменения скорости движения подвижного состава на коэффициент трения**

На рис. 1 представлена диаграмма, дающая представление о зависимости коэффициентов трения от скорости (значения величин нажатий на тормозную колодку не указаны: Гальтон не обнаружил зависимости коэффициента трения от силы нажатия).

На диаграмме даны три кривые, как максимальные, минимальные и средние коэффициенты трения. Средняя кривая получилась в результате наиболее часто применявшихся режимов торможения. Полученные графики имеют сходство с нынешними, представленными в Правилах тяговых расчетов [2]. На основании зависимости коэффициента трения от скорости



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента трения колодки о колесо от скорости по опытам Гальтона  
**Fig. 1.** Dependence of pad-on-wheel friction coefficient on speed according to Galton's experiments

движения поезда был предложен принцип реализации адаптивного управления тормозным нажатием [3]. На сегодняшний день получена экспериментальным путем формула для определения коэффициента трения с помощью метода бросания подвижной единицы [4].

По поводу своих опытов Гальтон указывает, что все время имелись налицо не поддающиеся учету погрешности (вероятно, вследствие различных величин нажатий на колодки). Ввиду этого он ограничился установлением фактов, полученных из опытов, и воздержался от вывода законов трения, выразив уверенность, что вопрос о трении в будущем получит более полное освещение.

### Исследования М. Мецкова

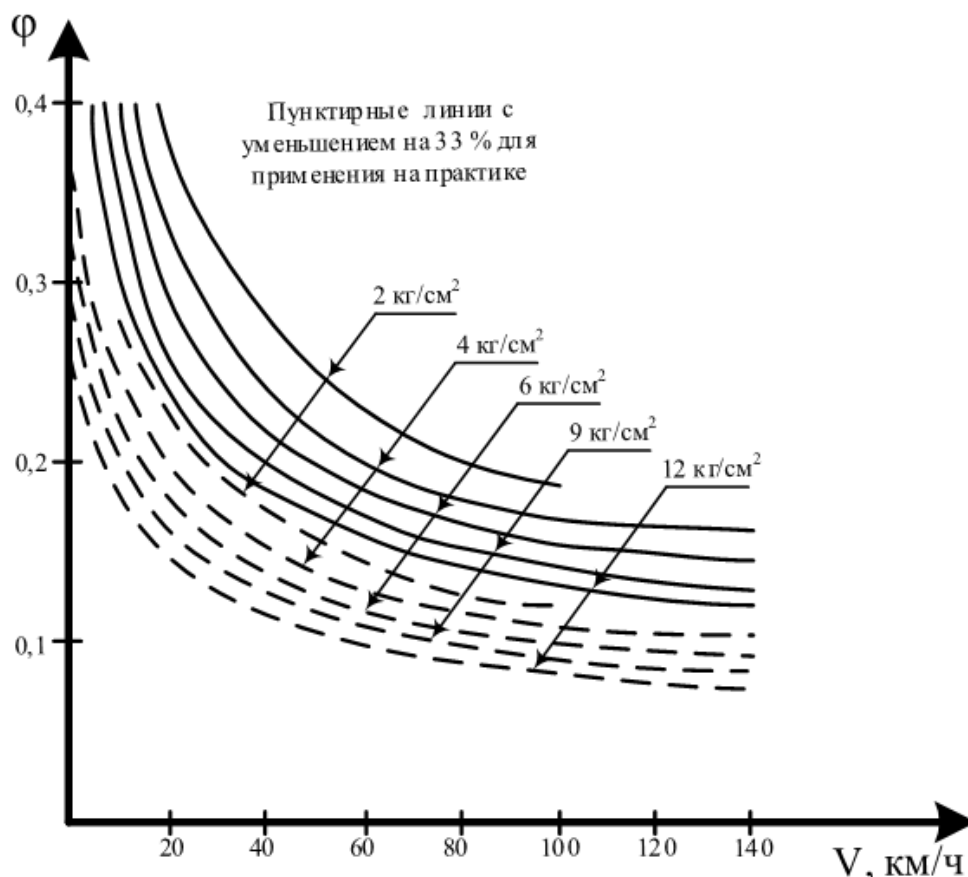
На рис. 2 изображены кривые коэффициента трения в зависимости от скорости движения поезда и силы нажатия колодки на колесо по опытам М. Мецкова, которые производились с моделью в одну треть от реальной тор-

можной колодки.

Вопрос о зависимости коэффициента трения от величины нажатия возник в связи с появлением потребности тормозить скоростные поезда при повышенных нажатиях тормозных колодок на колеса с последующим автоматическим переходом на понижение нажатия при низких скоростях. Интерес в этом отношении вызвало также применение груженого и порожнего режимов торможения в товарных поездах.

Испытание такой модели не могло дать близких к действительности данных, однако позволило установить ряд важных зависимостей коэффициента трения от скорости, величины нажатия, температуры и твердости материала.

Для того чтобы кривыми можно было пользоваться практически, их ординаты уменьшают на 33 % с целью приближения их величины к реальным по данным Научно-исследовательского института железнодорож-



**Рис. 2.** Коэффициент трения тормозных колодок в зависимости от скорости движения поезда и силы нажатия колодок на колесо по опытам М. Мецкова

**Fig. 2.** Friction coefficients of pads depending on the train speed and the wheel pressing force according to M. Metzko's experiments

ного транспорта (НИИЖТ). Кривые М. Мецкова с таким уменьшением ординат показаны на рис. 2 пунктиром.

Кривые М. Мецкова позволили лабораторно проверить, как изменяется коэффициент трения и как ведет себя тормозная колодка при высоких скоростях (порядка 140–160 км/ч). В этом состоит их положительная сторона. Недостаток же заключается в том, что нажатия на колодку не превосходили  $12 \text{ кг/см}^2$ , в то время как при высоких скоростях требуется доводить их до значительно большей величины, например, до  $25 \text{ кг/см}^2$ .

### Исследования Иллинойского университета в области трибологии

Опыты лаборатории, описанные в бюллетене № 257 Иллинойского университета, по своей методике и программе отличаются от представленных. Полученные кривые для малых нажатий колодки на колесо немного отличаются от кривых аналогичных опытов Гальтона, М. Мецкова и др.

Большой интерес представляют три кри-

вые (рис. 4), изображающие зависимость коэффициента трения от больших нажатий и высоких скоростей, когда мощность работы трения доходит до 12 000 и даже до 17 000 кгс/сек при нажатии 9 000 кг на колодку и при скорости 160 км/ч. Коэффициенты трения при последних условиях показаны на диаграмме самой жирной линией. Количество тепла, выделявшегося при таком трении, доходило до 125,60–164,47 Дж, причем тормозная колодка настолько раскалялась, что во время опытов от нее постоянно отрывались расплавленные частицы металла; поверхность трения свидетельствовала о начале разрушения материала из-за высокой температуры и большого нажатия.

На бандажах при таком напряжении работы тормозной колодки появлялись поперечные трещины длиной от 10 до 75 мм, не выходящие, однако, за пределы поверхности трения. Глубина их составляла от 3 до 5 мм. Трещины обычно проявлялись после окончания опыта во время остывания колеса, этот процесс сопровождался громким звенящим звуком. На поверхности трения бандажа обнаруживался также местами

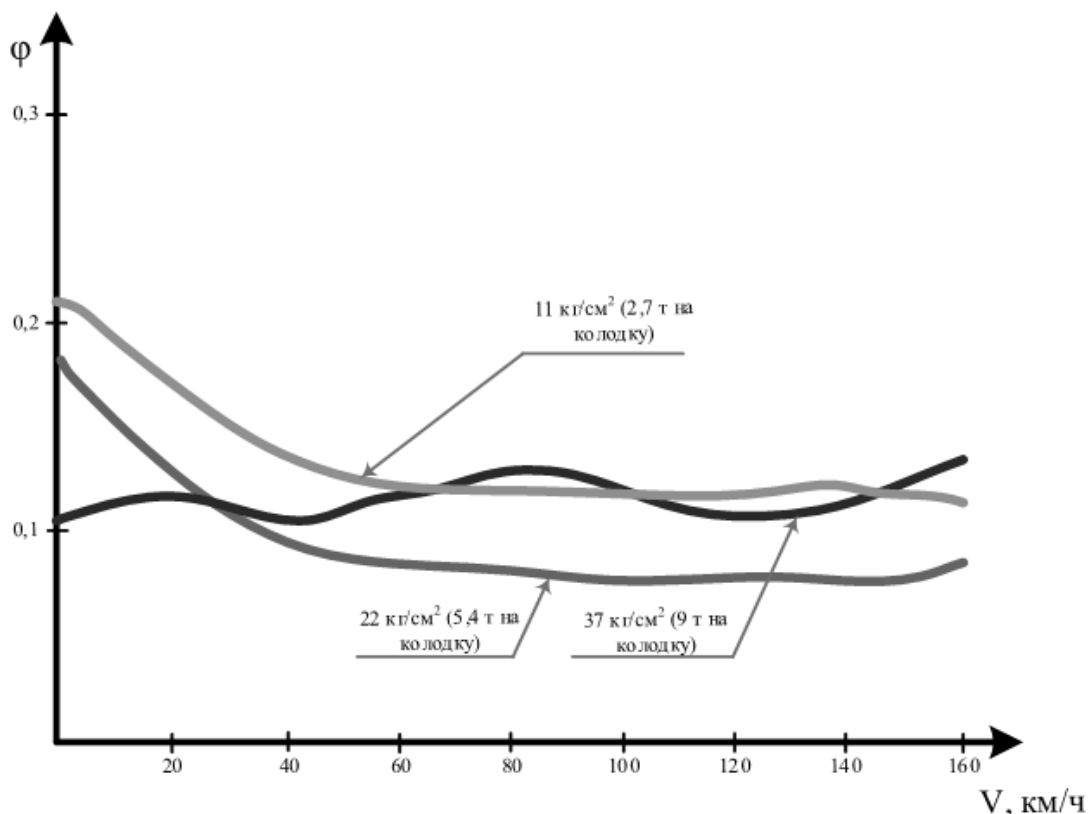


Рис. 3. Зависимости коэффициента трения от скорости движения при больших нажатиях по опытам Иллинойского университета

Fig. 3. Dependence of the friction coefficient on the speed of the train at high pressure according the Illinois University experiments

крепко приваренный металл колодки.

При нажатии на колодку силой больше 6 000 кг (30 кг/см<sup>2</sup>) получаются совсем иные зависимости коэффициентов трения от скорости, чем те, которые были ранее рассмотрены при меньших нажатиях. Оказывается, что в этих случаях, как это видно из диаграммы, коэффициенты трения иногда бывают выше, чем при меньших нажатиях, например, при 2 700 кг (11 кг/см<sup>2</sup>). В общем коэффициент трения при нажатиях от 6 000 до 9 000 кг, колеблясь по величине в небольших пределах, остается почти постоянным при всех скоростях от 160 км/ч до 0.

Такие резкие изменения законов трения при больших давлениях и высоких скоростях объясняются началом текучести и изменения поведения материала колодки. На рис. 4 показано состояние нескольких колодок после опытов с большим нажатием (до 9 000 кг) и при больших скоростях. Почти у всех колодок концы разрушены. Это разрушение наступало преимущественно тогда, когда колодка изнашивалась до минимальной допускаемой величины.

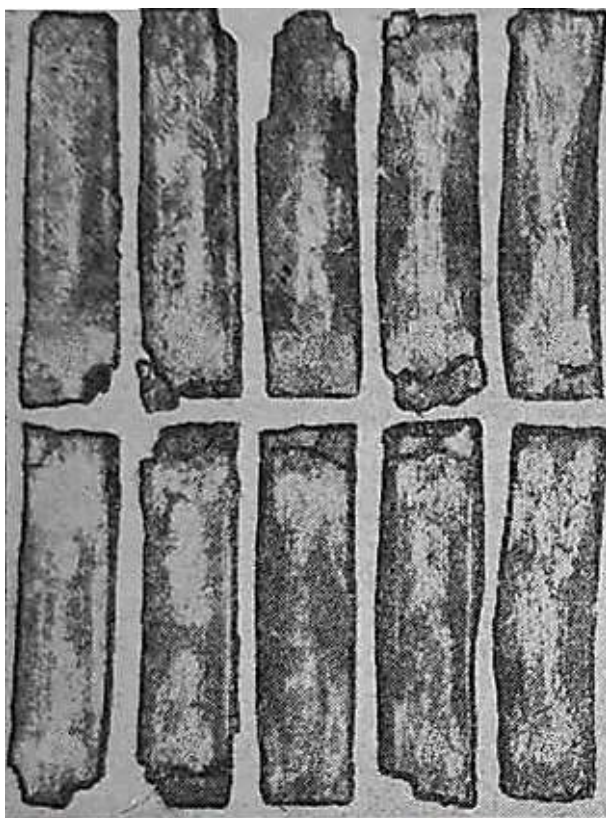


Рис. 4. Состояние тормозных колодок после опытов  
Fig. 4. The post experiment condition of the pads

Так как вопрос о большом нажатии тормозной колодки при высокой скорости имеет важное значение при проектировании тормозов для скоростных поездов, то не лишним будет привести здесь следующие выдержки из выводов тормозной лаборатории им. Сарджента:

1. Трещины на поверхности трения бандажа или обода стального колеса имелись тогда, когда нажатие тормозной колодки составляло 37 кг/см<sup>2</sup> при высоких скоростях 140–160 км/ч, а «волчки» от приваренного материала колодки обнаруживались, когда нажатия на колодку при тех же скоростях достигали 39–40 кг/см<sup>2</sup>. Для того чтобы избежать того и другого, нажатия должны быть такой величины, чтобы при заданной наивысшей скорости не превышалась работа трения 15 000 кгм/сек.

2. Чтобы износ тормозной колодки был более или менее нормальным, последняя должна нагружаться работой трения, не превышающей эффекта в 12 000 кгм/сек.

3. Для получения достаточно устойчивой по износу и прочной чугунной тормозной колодки последняя должна быть армирована стальной арматурой в виде решетки внутри и пластины на спинке. Эта арматура должна быть предварительно облужена, а расплавленный чугун перегрет для получения прочной спайки и монолитности.

4. Твердость колодки по Бринеллю рекомендуется доводить от 220 до 240 при твердости обода колеса 240–300 ед.

#### **Коэффициент трения тормозных колодок по опытам Научно – исследовательского института железнодорожного транспорта**

В 1936 г. на опытном кольце НИИЖТ профессор В.Ф. Егорченко производил опыты с тормозными колодками разных типов на товарных четырехосных и двухосных вагонах.

Кривизна рельсового пути не влияла на результаты опытов, так как радиус опытного кольца был сравнительно большой – около 950 м; дополнительное сопротивление от кривой было определено опытным путем и учтено при выводе формулы коэффициентов трения колодок.

Из этих опытов был получен большой материал и сделаны важные выводы:

1. Тормозной путь поезда в значительной степени зависит от качества материала и размеров тормозных колодок.



2. Как общее правило, повышение твердости чугуна колодки сопровождается уменьшением коэффициента трения и снижением износа.

3. Увеличение поверхности соприкосновения колодки с колесом ведет к повышению коэффициента трения и уменьшению износа.

4. Чугунные колеса повышают коэффициент трения тормозных колодок на малых скоростях и понижают при больших.

5. Снабжение колодки гребневым охватом (охватывающим гребень колеса) повышает коэффициент трения колодки, незначительно (2–5 %).

В этих опытах определялась зависимость коэффициента трения от скорости и нажатия 18 типов колодок для 35 комбинаций и трех типов колес.

Полученные в результате опытов кривые подтверждают характер зависимости коэффициентов трения от скорости и нажатия, полученных ранее из американских и немецких опытов. Однако более близкое сходство они имеют с кривыми Гальтона (см. рис.1), в особенности при малых нажатиях колодок. Объясняется это тем, что испытания производились на рельсовых путях в натуре.

Если произвести нажатие тормозной колодки на колесо при поддержании постоянной

скорости, то коэффициент трения некоторое время от начала торможения будут уменьшаться.

На рис. 5 показана зависимость по опытам Гальтона величины коэффициента трения от продолжительности торможения в течение первых 10–20 сек при пяти скоростях: 32, 43, 60, 76 и 97 км/ч. Из этой диаграммы видно, что уменьшение коэффициента трения тем продолжительнее и больше, чем меньше скорость. Например, при скорости 32 км/ч коэффициент трения падает в течение первых 20 сек на величину 0,08, а при скорости 97 км/ч в течение первых 10 сек всего на 0,03.

На рис. 6 изображена диаграмма (из опытов Гальтона), из которой видно, что, несмотря на уменьшающуюся скорость, коэффициент трения в течение 24 сек не повышается, как это должно быть по закону зависимости от скорости, а остается одинаковым и понижается. Это объясняется тем, что после начатого торможения коэффициент трения имеет некоторое стремление уменьшаться.

Закон зависимости коэффициента трения от продолжительности торможения обнаруживается также и в опытах М. Мецкова. Однако в его отчете нет прямых указаний на это.

Закон зависимости коэффициента трения от продолжительности трения, относящийся, правда, только к началу всякого торможения,

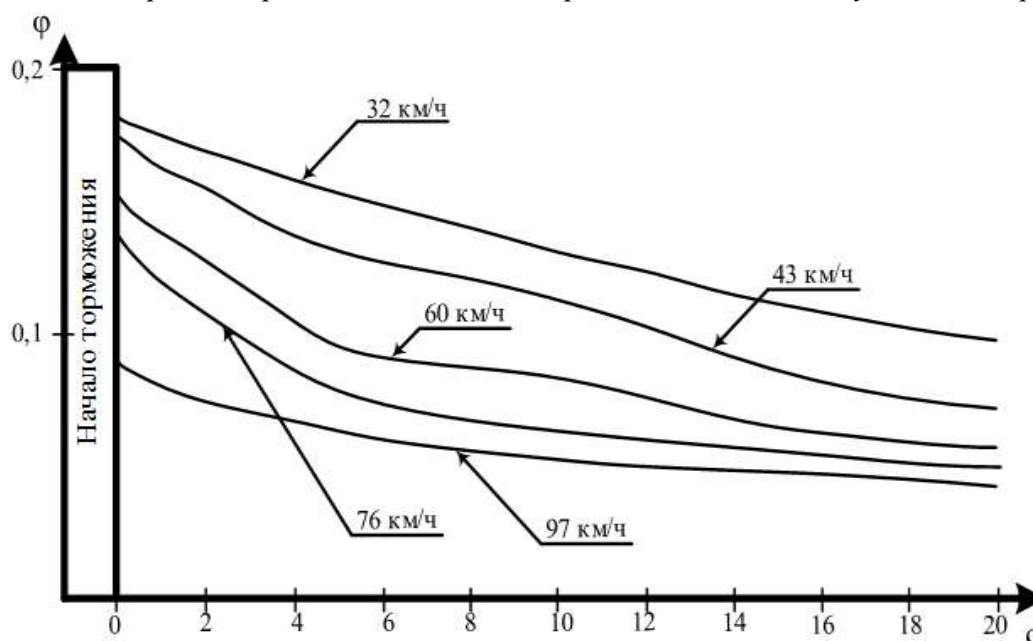


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от начальной продолжительности трения при постоянных скорости и силе нажатия колодки на колесо

Fig. 5. Dependence of the friction coefficient on the initial duration of friction under constant speed and pad-on-wheel pressure force

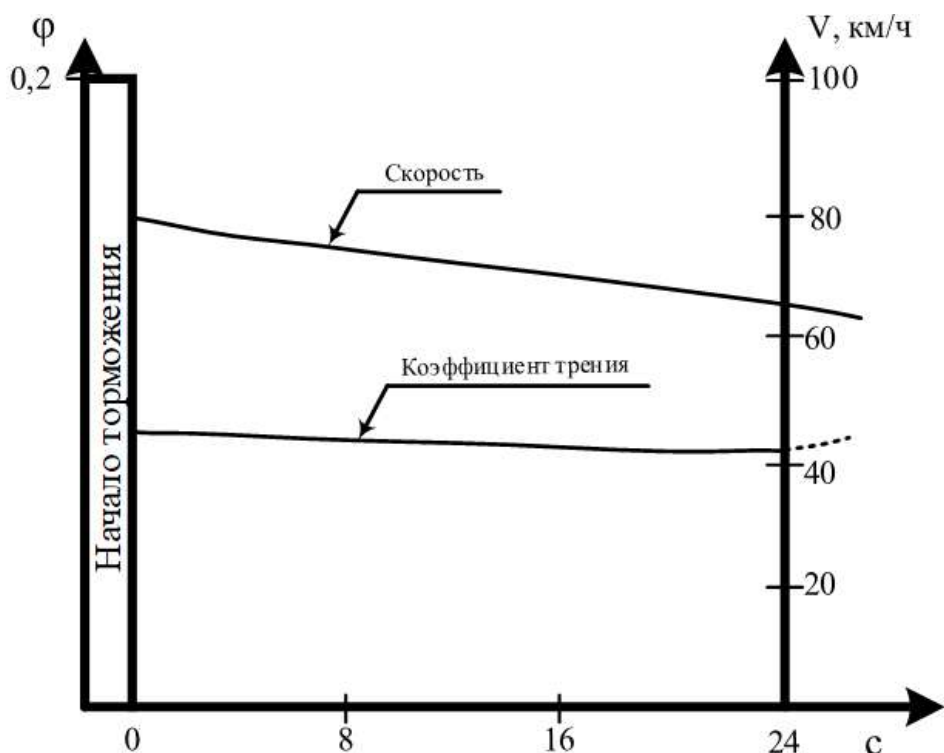


Рис. 6. Начальное падение коэффициента трения, которое компенсируется его повышением вследствие замедления скорости

Fig. 6. Initial friction coefficient decrease compensated by its increase due to deceleration

несколько усложняет вопрос о законе зависимости силы трения от скорости и силы нажатия на колодку.

*Зависимость коэффициента трения от нагрева тормозной колодки.* При исследовании влияния температуры на коэффициент трения в опытах М. Мецкова было установлено, что коэффициент трения с повышением температуры не понижается, а как будто слегка увеличивается. Проведены исследования влияния температуры на динамику изменения коэффициента трения, которые были изложены в [5, 6].

Опыты в тормозной лаборатории при Иллинойском университете подтверждают эти данные полностью. Помещаем выдержку из отчета по этим опытам: «Среди железнодорожников широко распространено мнение, что при продолжительном торможении происходит понижение тормозных качеств колодки, причем предполагается, что коэффициент трения значительно падает вследствие нагревания колодки и колеса. Опыты этой серии были предприняты для проверки правильности этого мнения. Можно установить, что результаты опытов не подтвердили этого мнения» (при 15-минутных

непрерывных торможениях при разных скоростях и нажатиях).

При этих опытах сравнивались коэффициенты трения кратковременных торможений – от 0,5 до 1,0 мин. с коэффициентами трения при 15-минутном непрерывном торможении.

Разница в коэффициенте в сторону повышения при 15-минутных торможениях, при которых происходил весьма большой нагрев колодок до темно-красного каления, была в среднем около 12 %.

Таким образом, результаты опытов приводят к заключению, что нагрев колодок повышает коэффициент трения. И в этом, как указывается в отчете, нет ничего удивительного, так как из практики известно, что при более мягком материале, хотя бы одной из трущихся поверхностей, при сухом трении коэффициент его больше, чем при твердом материале. Так как длительное трение, нагревая тормозные колодки до высокой температуры, размягчает их, то, естественно, коэффициент трения их должен соответственно повышаться.

Наконец, по опытам Центрального исследовательского отделения подвижного состава Национального общества французских желез-

Изменение коэффициентов трения в процентах при влажных тормозных колодках по сравнению с сухими  
Percent change in friction coefficients for damp brake pads as compared to dry ones

Удельное давление в кг/см <sup>2</sup> Specific pressure kg/cm <sup>2</sup>	V = 25 км/ч	V = 60 км/ч	V = 100 км/ч
	Изменение коэффициента трения, % Change in friction coefficient, %		
5	-14,1	-15,6	+15,2
6	-18,7	-11,8	+24,2
12	-16,9	+3,2	+22,7

ных дорог в 1937 г. комиссия констатирует, что «при испытании тормозов на затяжных уклонах обнаружена независимость коэффициента трения от температуры в измерявшихся пределах от 100 до 700° при помощи термоэлектрических пар, так что при езде по длинному уклону нет основания опасаться ослабления тормозной силы по причине нагрева колодок».

На текущий момент зарубежными учеными активно проводятся исследования вопроса влияния температуры на трибологические свойства взаимодействующих тел, так в [7] рассматривается воздействие термопластических деформаций в процессе торможения. В [7, 8] говорится о влиянии появления третьего тела в области трения колодки и колеса вследствие отделяемых в ходе износа частиц. Но подавляющее большинство авторов исследуют температурную динамику в системе «колодка – колесо» или «колодка – диск» [9–13], чаще всего ее исследуют как фактор, влияющий на разрушение материалов. В работе [14, 15] изучается непосредственное влияние температуры колодки на силу сцепления, для дискового тормоза рассматривается температурное распределение на диске. В работе [16] приводятся экспериментальные исследования процесса торможения грузовых поездов Итальянских железных дорог для различных видов тормозных колодок. Применение колодочных тормозов влияет на температуру круга катания колес. Изменение температуры круга катания также оказывает влияние на силу сцепления колеса с рельсом. Исследованию этого вопроса посвящен ряд работ [17–20].

### Влияние влажности на величину коэффициента трения

Инженером М. Мецковым были проделаны опыты, определяющие влияние влажности на коэффициент трения между тормозными колодками и колесами при различных удельных давлениях и скоростях. Во время опытов коле-

со трения искусственно смачивалось водой. Результаты этих опытов в виде средних величин даны в табл., в которой цифры с минусами означают число процентов уменьшения коэффициента трения по сравнению с сухими колодками, а с плюсами – его увеличение. Например, при  $x = 6 \text{ кг/см}^2$  и  $V = 25 \text{ км/ч}$  коэффициент трения при мокрых колодках на 18,7 % меньше, чем при сухих.

### Заключение

Коэффициент трения зависит от следующих факторов:

- силы нажатия колодки на колесо;
- химического состава колодки;
- формы колодки;
- степени влажности колодки;
- износа колодки;
- начальной продолжительности трения;
- температуры колодки и поверхности катания колеса.

Среди вышеуказанных факторов стоит уделить особое внимание влиянию температуры на динамику изменения коэффициента трения. Этот вопрос является особенно актуальным при торможениях подвижного состава на затяжных спусках. Исследования в данной области проводились в недостаточном количестве, а имеющиеся данные не создают единого понимания этого вопроса и требуют проведения дополнительных опытов и систематизации.

В работе [21] были рассмотрены актуальные вопросы, связанные с ремонтом подвижного состава и функционированием тормозного оборудования, в том числе в сложных эксплуатационных условиях. Нами был разработан стенд для исследования динамики изменения коэффициента трения в зависимости от температуры, который проходит завершающий этап сборки и отладки. В дальнейших статьях будет описана конструкция стенда, принцип замера коэффициента трения и тормозной силы. Конечным результатом исследований должна

статья уточненная формула расчета коэффициента трения температурным коэффициентом, что позволит оптимизировать алгоритмы управления тормозной системой поезда, а также исключить значительную погрешность в тормозных расчетах.

### Список литературы

1. Карвацкий Б.Л. Общая теория автотормозов. М. : Трансжелдориздат, 1947. 300 с.
2. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы : распоряжение ОАО «РЖД» 867р от 12.05.2016 : в ред. 02.02.2018. М. : ОАО «РЖД», 2016. 515 с.
3. Иванов П.Ю., Корсун А.А., Емельянов Д.О. Существующие способы управления тормозным нажатием с повышенной эффективностью // Научные междисциплинарные исследования : сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. М. : КДУ ; Добросвет, 2021. С. 28–36.
4. Исследование работы стабилизатора крана машиниста / П.Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, Н.И. Мануилов и др. // Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств : материалы II Всерос. науч.-техн. конф. Омск : ОмГУПС, 2017. С. 62–69.
5. Исследование температуры тормозных колодок с разной степенью износа в процессе фрикционного торможения / П.Ю. Иванов, А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский и др. // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 3 (47). С. 27–34. DOI 10.20291/2079-0392-2020-3-27-34.
6. Иванов П.Ю., Хамнаева А.А., Худоногов А.М. Снижение энергопотребления электровоза при управлении пневматическими тормозами грузового поезда // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : материалы III междунар. науч.-практ. конф. Омск, 06 декабря 2018 года. Омск : ОмГУПС, 2018. С. 143–151.
7. Temperature and thermoelastic instability at tread braking using cast iron friction material / S. Abbasia, Sh. Teimourimaneshb, T. Vernerssonb et al. // Wear. 2013. Vol. 314. P. 171–180.
8. Hamdaoui A., Jaddi El.H. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 149. P. 1–4.
9. Evtushenko O.O., Ivanyk E.H., Horbachova N.V. Analytic methods for thermal calculation of brakes (review) // Materials Science. 2000. Vol. 36. №. 6. P. 857–862.
10. Petersson M. Two-dimensional finite element simulation of the thermal problem at railway block braking // Mechanical Engineering Science. 2015. Vol. 216. P. 259–273.
11. The effect of braking energy on the fatigue crack propagation in railway brake discs / Z. Li, J. Han, Z. Yang // Engineering Failure Analysis. 2014. Vol. 44. P. 272–284.
12. A methodology to predict thermomechanical cracking of railway wheel treads: from experiments to numerical predictions / A. Esmaeili, M.S. Walia, K. Handa // International Journal of Fatigue. 2017. Vol. 105. P. 71–85.
13. Wasilewski P. Frictional heating in railway brakes: a review of numerical models // Archives of Computational Methods in Engineering. 2020. Vol. 58. P. 45–58.
14. Balotin J.G., Neis P.D., Ferreira N.F. Analysis of the influence of temperature on the friction coefficient of friction materials // ABCM Symposium Series in Mechatronics. 2010. Vol. 4. P. 898–906.
15. Talati F., Jalalifar S. Analysis of heat conduction in a disk brake system // Heat Mass Transfer. 2009. Vol. 45. P. 1047–1059.
16. Cantone L., Ottati A., Modelling of friction coefficient for shoes type LL by means of polynomial fitting // The Open Transportation Journal. 2018. Vol. 12. P. 114–127.
17. 3D dynamic model of the railway wagon to obtain the wheel–rail forces under track irregularities / N. Meysam, A.Z. Jabbar, Sh. Morad // Multi-Bodies Dynamics. 2015. Vol. 252. P. 1–13.
18. Wei Y.P., Wu Y.P. Thermal and mechanical characteristics of contact friction pair based on 3-D wheel/rail-foundation contact vertical system // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 657. P. 1–9.
19. Polach O. Influence of locomotive tractive effort on the forces between wheel and rail // Vehicle System Dynamics Supplement. 2001. Vol. 35. P. 7–22.
20. Tudor A., Radulescu C., Petre I. Thermal effect of the brake shoes friction on the wheel/rail contact // Tribology in industry. 2003. Vol. 25. P. 27–32.
21. Дульский Е.Ю. Энергоаудит безразборной технологии ремонта // Мир транспорта. 2012. Т. 10. № 3 (41). С. 168–171.

### References

1. Karvatskii B.L. Obshchaya teoriya avtotormozov [The general theory of auto brakes]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1947. 300 p.
2. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» 867r ot 12.05.2016 (red. 02.02.2018) «Ob utverzhdenii pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» [Order of JSC «Russian Railways» 867r dated 12.05.2016 (ed. 02.02.2018) «On approval of the rules of traction calculations for train work»]. Moscow: RZhD Publ., 2016. 515 p.
3. Ivanov P.Yu., Korsun A.A., Yemelyanov D.O. Sushchestvuyushchie sposoby upravleniya tormoznym nazhatiem s povyshennoi effektivnost'yu [Existing methods of brake pressure control with increased efficiency]. *Sbornik statei XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnye mezhdistsiplinarnye issledovaniya»* [Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference «Scientific interdisciplinary research»]. Saratov, 2021, pp. 28–36.
4. Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu., Manuilov N.I., Khudonogov A.M. Issledovanie raboty stabilizatora kрана машиниста [Investigation of the operation of the crane operator stabilizer]. *Materialy II vsrossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Inno-*

vatsionnye proekty i tekhnologii mashinostroitel'nykh proizvodstv» [Proceedings of the II All-Russian Scientific and practical Conference «Innovative projects and technologies of machine-building industries»]. Omsk, 2017, pp. 62–69.

5. Ivanov P.Yu., Khudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Korsun A.A., Treskin S.V. Issledovanie temperatury tormoznykh kodok s raznoi stepen'yu iznosa v protsesse friktsionnogo tormozheniya [Investigation of the temperature of brake pads with different degrees of wear during friction braking]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Railways], 2020, no. 3(47), pp. 27–34. DOI 10.20291/2079-0392-2020-3-27-34.

6. Ivanov P.Yu., Khamnaeva A.A., Khudonogov A.M. Snizhenie energopotrebleniya elektrovoza pri upravlenii pnevmaticheskimi tormozami gruzovogo poezda [Reduction of electric locomotive energy consumption when controlling pneumatic brakes of a freight train]. *Materialy III mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razrabotka i ekspluatatsiya elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem energetiki i nazemnogo transporta»* [Proceedings of the III International scientific and practical conference «Development and operation of electrotechnical complexes and systems of power engineering and ground transport»]. Omsk, 2018, pp. 143–151.

7. Temperature and thermoelastic instability at tread braking using cast iron friction material / S. Abbasia, Sh. Teimourimanesb, T. Vernersson et al. // *Wear*. 2013. Vol. 314. Pp. 171–180.

8. Hamdaoui A., Jaddi El.H. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 149. Pp. 1–4.

9. Evtushenko O.O., Ivanyk E.H., Horbachova N.V. Analytic methods for thermal calculation of brakes (review) // *Materials Science*. 2000. Vol. 36. No. 6. Pp. 857–862.

10. Petersson M. Two-dimensional finite element simulation of the thermal problem at railway block braking // *Mechanical Engineering Science*. 2015. Vol. 216. Pp. 259–273.

11. The effect of braking energy on the fatigue crack propagation in railway brake discs / Z. Li, J. Han, Z. Yang // *Engineering Failure Analysis*. 2014. Vol. 44. Pp. 272–284.

12. A methodology to predict thermomechanical cracking of railway wheel treads: from experiments to numerical predictions / A. Esmaeili, M.S. Walia, K. Handa // *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 105. Pp. 71–85.

13. Wasilewski P. Frictional heating in railway brakes: a review of numerical models // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020. Vol. 58. Pp. 45–58.

14. Balotin J.G., Neis P.D., Ferreira N.F. Analysis of the influence of temperature on the friction coefficient of friction materials // *ABCM Symposium Series in Mechatronics*. 2010. Vol. 4. Pp. 898–906.

15. Talati F., Jalalifar S. Analysis of heat conduction in a disk brake system // *Heat Mass Transfer*. 2009. Vol. 45. P. 1047–1059.

16. Cantone L., Ottati A., Modelling of friction coefficient for shoes type LL by means of polynomial fitting // *The Open Transportation Journal*. 2018. Vol. 12. Pp. 114–127.

17. 3D dynamic model of the railway wagon to obtain the wheel–rail forces under track irregularities / N. Meysam, A.Z. Jabbar, Sh. Morad // *Multi-Bodies Dynamics*. 2015. Vol. 252. Pp. 1–13.

18. Wei Y.P., Wu Y.P. Thermal and mechanical characteristics of contact friction pair based on 3-D wheel/rail-foundation contact vertical system // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 657. Pp. 1–9.

19. Polach O. Influence of locomotive tractive effort on the forces between wheel and rail // *Vehicle System Dynamics Supplement*. 2001. Vol. 35. Pp. 7–22.

20. Tudor A., Radulescu C., Petre I. Thermal effect of the brake shoes friction on the wheel/rail contact // *Tribology in industry*. 2003. Vol. 25. Pp. 27–32.

21. Dul'skii E. Yu. Energoaudit bezrazbornoi tekhnologii remonta [Energy audit of non-selective repair technology]. *Mir transporta* [World of transport], 2012, vol. 10, no. 3(41), pp. 168–171.

### Информация об авторах

**Корсун Антон Александрович**, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: korsunanton1998@gmail.com.

**Иванов Павел Юрьевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

**Осипов Дмитрий Валерьевич**, кафедра электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: osipovdnor@mail.ru.

**Тихонов Дмитрий Андреевич**, кафедра электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: sonexperia.hd@gmail.com.

### Information about the authors

**Anton A. Korsun**, Ph.D. Student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: korsunanton1998@gmail.com.

**Pavel Yu. Ivanov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

**Dmitrii V. Osipov**, Department of the Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: osipovdnor@mail.ru.

**Dmitrii A. Tikhonov**, Department of the Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: sonexperia.hd@gmail.com.

## Оценка влияния системы охлаждения электровоза и параметров движения поезда на трещинообразование в остовах тягового электродвигателя НБ-514

А.Ю. Портной, К.П. Селедцов✉, О.В. Мельниченко, М.В. Мищенко

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

✉kostyans7kss@gmail.com

### Резюме

Целью данной работы является выявление причин возникновения трещин в остовах тяговых электродвигателей современных отечественных электровозов. Приведен анализ статистики выявления трещин в остовах тяговых электродвигателей НБ-514 на Восточном полигоне, показывающий, что практически каждый третий остов данного тягового электродвигателя в эксплуатации имеет трещины, при этом основная доля выявленных трещин приходится на электровозы серий 2,3,4ЭС5К. Проведено математическое моделирование на электронно-вычислительной машине с применением метода конечных элементов. Рассмотрены результаты математического моделирования механических напряжений, возникающих в остовах тягового электродвигателя НБ-514 при его неравномерном нагреве до температур, характерных для часового режима работы тягового электродвигателя. Выявлено, что механические напряжения, возникающие только из-за разности температур окружающего воздуха и обмоток главных и дополнительных полюсов тягового электродвигателя, могут достигать механических напряжений свыше 100 МПа, что превышает предел выносливости стали остова. Выполнены математические расчеты возникающих механических напряжений в остовах тягового электродвигателя в зависимости от его нагрева при эксплуатации на горно-перевальном участке Большой Луг – Слюдянка Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги». Сделан вывод, что одной из основных причин трещинообразования в остовах тяговых электродвигателей является наличие температурных напряжений, вызванных воздействием малоциклового усталости из-за нагрева двигателя при снижении расхода воздуха на охлаждение тягового электродвигателя. Для уменьшения трещинообразования в остовах тягового электродвигателя НБ-514 предлагается либо увеличить расхода воздуха системой вентиляции, либо изменить формы вентиляционного и смотрового окон остова данного тягового электродвигателя.

### Ключевые слова

тяговый электродвигатель, механические напряжения, трещинообразование, нагрев электродвигателя, математическое моделирование, тяга поездов

### Для цитирования

Оценка влияния системы охлаждения электровоза и параметров движения поезда на трещинообразование в остовах тягового электродвигателя НБ-514 / А.Ю. Портной, К.П. Селедцов, О.В. Мельниченко, М.В. Мищенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 101–111. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).101-111.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 19.04.2022 г.; поступила после рецензирования: 10.06.2022 г.; принята к публикации: 14.06.2022 г.

## Evaluation of the influence of the cooling system of an electric locomotive and the parameters of train movement on cracking in the frame of the NB-514 traction motor

A.Yu. Portnoi, K.P. Seledtsov✉, O.V. Melnichenko, M.V. Mishchenkov

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉kostyans7kss@gmail.com

### Abstract

The purpose of this work is to identify the causes of cracks in the frames of traction electric motors of modern domestic electric locomotives. An analysis of the statistics of detection of cracks in the frames of NB-514 traction motors at the Eastern range is given, showing that almost every third frame of this traction motor in operation has cracks, while the main share of the identified cracks falls on electric locomotives of the 2,3,4ES5K series. The results of mathematical modeling of mechanical stresses arising in the frame of the NB-514 traction motor during its uneven heating to temperatures typical for the hourly operation of the traction motor are considered. It was revealed that mechanical stresses arising only from the temperature difference between the ambient air and the windings of the main and additional poles of the traction motor can reach mechanical stresses over 100 MPa, which exceeds the endurance limit of the frame steel. Mathematical calculations of the arising mechanical stresses in the frame of

the traction electric motor are performed depending on its heating during operation at the mountain pass section Bolshoi Lug – Slyudyanka of the East Siberian Railway – a branch of Russian Railways. It is concluded that one of the main causes of cracking in the frames of traction motors is the presence of thermal stresses caused by low-cycle fatigue due to engine heating with a decrease in air consumption for cooling the traction motor. To reduce cracking in the frame of the NB-514 traction motor, it is proposed either to increase the air flow by the ventilation system, or to change the shape of the ventilation and viewing windows of the frame of this traction motor.

### Keywords

traction motor, mechanical stresses, cracking, electric motor heating, mathematical modeling, train traction

### For citation

Portnoi A.Yu., Seledtsov K.P., Mel'nichenko O.V., Mishchenkov M.V. Otsenka vliyaniya sistemy okhlazhdeniya elektrovoza i parametrov dvizheniya poyezda na treshchinoobrazovaniye v ostove tyagovogo elektrodvigatelya NB-514 [Evaluation of the influence of the cooling system of an electric locomotive and the parameters of train movement on cracking in the frame of the NB-514 traction motor]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 101–111. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).101-111.

### Article info

Received: April 19, 2022; revised: June 10, 2022; accepted: June 14, 2022.

### Введение

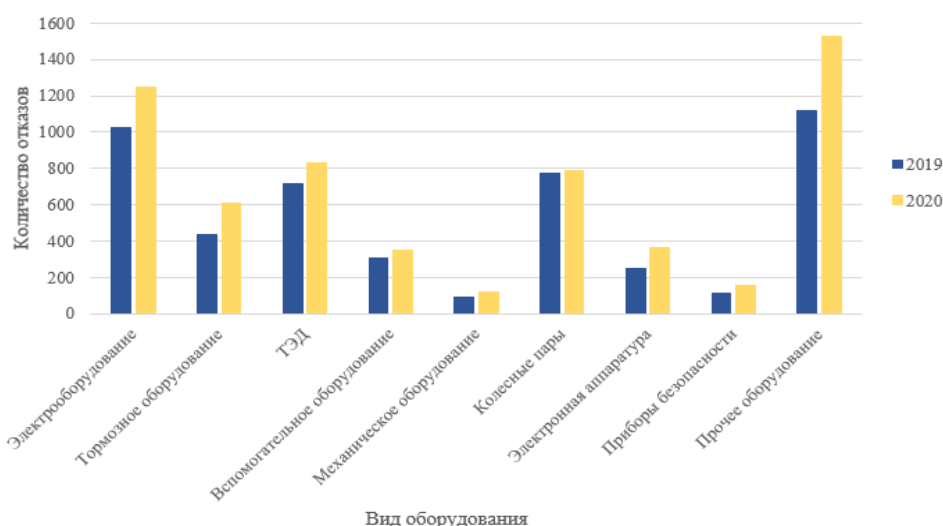
Сегодня одна из приоритетных задач на железнодорожном транспорте – увеличение весовых норм перевозимых грузов, погонных и весовых нагрузок подвижного состава. При этом должен меняться технический уровень электроподвижного состава для соответствия новым требованиям.

В работе рассматривается влияние системы охлаждения электровоза и массы поезда на нагрев тягового электродвигателя НБ-514 электровоза с последующим трещинообразованием в его остове. Увеличение массы поезда порождает ряд проблем по части взаимодействия колеса и рельса, например, усиленный износ по-

верхности катания колес и рельсов, угон пути, возникновение дополнительного воздействия на путь при изменении продольных сил в поезде и др. [1–3]. При возрастании массы состава электровозу приходится работать на больших значениях силы тяги, которые достигают предельных значений по сцеплению. Это приводит к росту силы тока в тяговых электродвигателях электровоза и увеличению нагрева их обмоток.

### Статистические данные

Тяговый электродвигатель – один из основных повреждаемых узлов электровоза. На рис. 1 представлены данные ООО «ЛокоТех» о статистике отказов оборудования электровозов в



**Рис. 1.** Статистика отказов оборудования электровозов в сервисных локомотивных депо Братское, Северобайкальск, Нижнеудинск и Иркутское за 2019–2020 гг.

**Fig.1.** Equipment failure statistics for electric locomotives in the servicing locomotive depots of Bratskoe, Severobaikalsk, Nizhneudinsk and Irkutskoe in 2019–2020

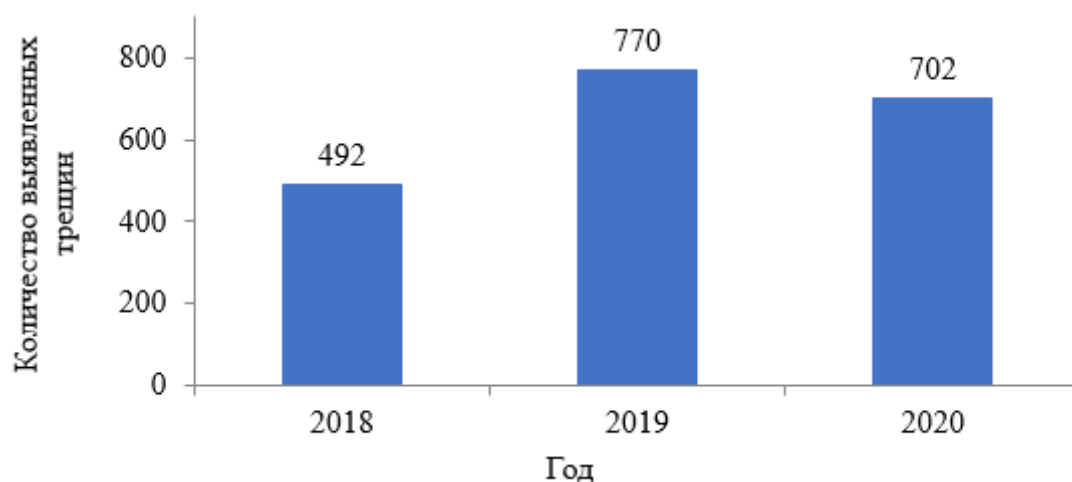
сервисных локомотивных депо (СЛД) Братское, Северобайкальск, Нижнеудинск и Иркутское за 2019–2020 гг.

К неисправностям тяговых электродвигателей относят: образование трещин в остове, повреждения моторно-якорных подшипников, якоря, полюсов, компенсационной обмотки и др. На рис. 2 показана статистика выявления трещин в остовах тяговых электродвигателей электровозов серий ВЛ80С, Р, ВЛ85 и 2,3,4ЭС5К на Восточном полигоне.

По статистическим данным практически

каждый третий остов тягового электродвигателя НБ-514, находящийся в эксплуатации, имеет трещины (рис. 3, а).

Образование трещин в остовах разных типов тяговых электродвигателей происходит в одном и том же месте (рис. 3, б). Данные трещины возникают вблизи смотрового и вентиляционного окон с коллекторной стороны двигателя, что приведет к ускоренному выходу из строя двигателя и потребует постановки электровоза на непланный ремонт и вызовет значительные затраты и издержки.

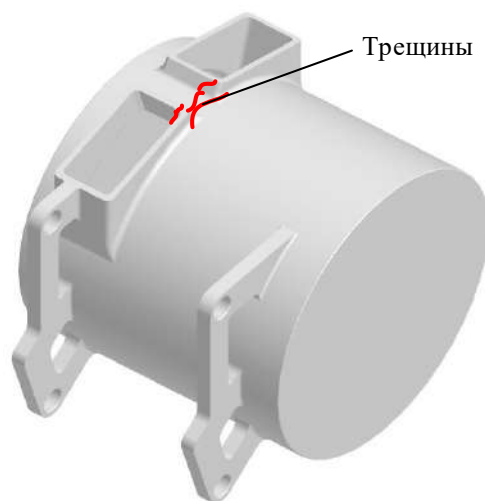


**Рис. 2.** Статистика выявления трещин в остовах тяговых электродвигателей НБ-514 электровозов серий ВЛ80С, Р, ВЛ85 и 2,3,4ЭС5К на Восточном полигоне за 2018–2020 гг.

**Fig. 2.** Crack detection statistics in traction NB-514 electric motor frames of the electric locomotives of BL80S, RBL85 and 2,3,4 TS5K series at the Eastern range in 2018–2020



а



б

**Рис. 3.** Трещины в остове тягового электродвигателя НБ-514:

а – фотография возникающих трещин; б – схема расположения трещин на упрощенной модели

**Fig. 3.** Cracks in the frame of the traction electric motor NB-514:

а – photo of the emerging cracs; б – crack location scheme on the simplified model

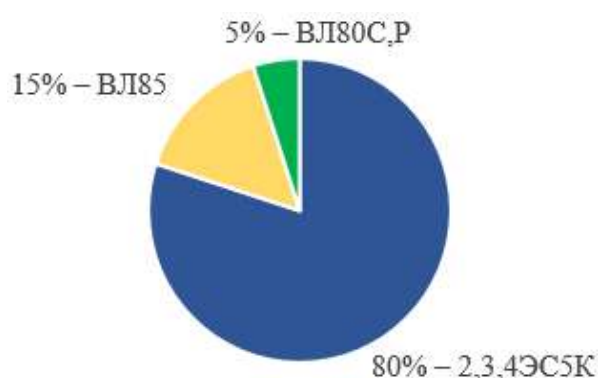


Выявленные в остовах тяговых электродвигателей трещины заваривают после выкатки колесно-моторного блока при проведении текущего ремонта в объеме ТР-1. При этом, например, в СЛД Иркутское, на ТР-1 практически каждый тяговый электродвигатель электровоза «Ермак», работающего в режиме подталкивания на горно-перевальном участке Большой Луг – Слюдянка Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», имеет трещины в остовах, (см. рис. 3).

На рис. 4 показано процентное соотношение выявленных трещин в остовах тяговых электродвигателей НБ-514 для электровозов

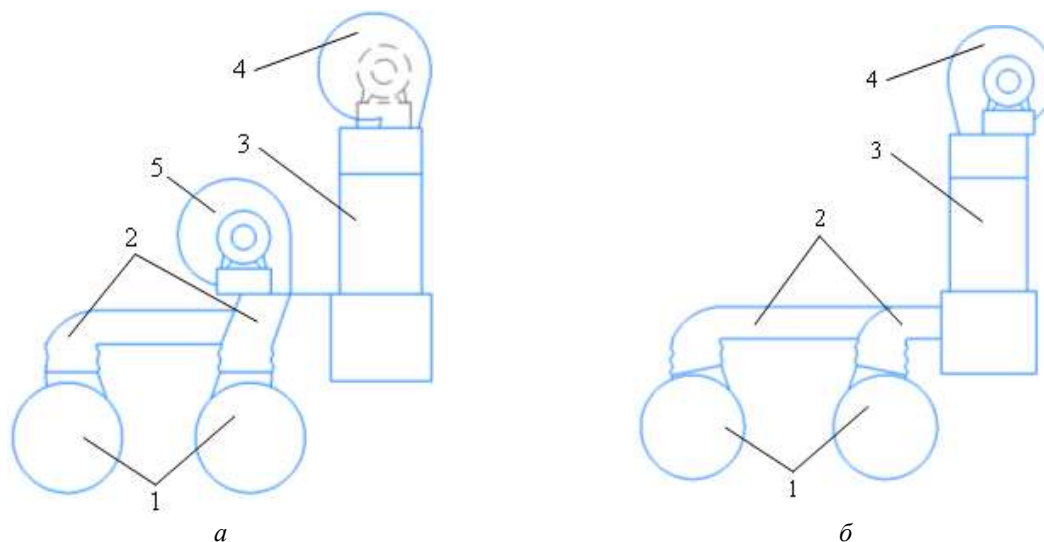
серий ВЛ80С, Р, ВЛ85 и 2,3,4ЭС5К на Восточном полигоне.

Из рис. 4 видно, что основная доля трещин (80 %) в остовах тяговых электродвигателей НБ-514 приходится на современные отечественные электровозы серий 2,3,4ЭС5К. Такой значительный отрыв по трещинам в остовах натолкнул авторов на мысль сравнить количество расхода охлаждающего воздуха на тяговые электродвигатели по сериям электровозов переменного тока, так как значение температуры нагрева остова тягового электродвигателя напрямую влияет на величину механических напряжений в нем.



**Рис. 4.** Доля выявленных трещин в остовах тяговых электродвигателей НБ-514, приходящаяся на разные серии электровозов

**Fig. 4.** Proportion of detected cracks in the frames of traction electric motors NB-514 for electric locomotives of different series



**Рис. 5.** Система принудительной вентиляции на электровозах:

*a* – серий ВЛ80С, Р; *б* – серий ВЛ85, 2,3,4ЭС5К

(1 – тяговые электродвигатели; 2 – воздуховоды к двигателям; 3 – выпрямительно-инверторный преобразователь; 4, 5 – центробежные вентиляторы)

**Fig. 5.** Forced ventilation system in electric locomotives: *a* – VL80S,R series; *b* – BL85,3,4ES5K series (1 – traction electric motors; 2 – motor air ducts; 3 – rectifying-inverter converter; 4,5-centrifugal fans)

Для охлаждения тяговых электродвигателей на рассматриваемых электровозах установлена система принудительной вентиляции (рис. 5), которая обеспечивает пропускание необходимого объема воздуха согласно техническим требованиям.

На электровозах серий ВЛ80С и ВЛ80Р охлаждение тяговых электродвигателей и выпрямительно-инверторного преобразователя осуществляется раздельно [4, 5]. На электровозах серий ВЛ85 и 2,3,4ЭС5К охлаждающий воздух от центробежного вентилятора охлаждает сначала выпрямительно-инверторный преобразователь, а затем поступает к тяговым электродвигателям [6, 7].

В настоящее время тяговый электродвигатель НБ-514 устанавливается на электровозах серий ВЛ80С, ВЛ80Р модификации НБ-514Б взамен НБ-418К6 [8], серий ВЛ85, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К модификации НБ-514Б [6, 7] и серии 3ЭС5К модификации НБ-514Е [9]. В табл. 1 указан расход воздуха системой вентиляции на охлаждение каждого тягового электродвигателя по сериям электровозов.

**Таблица 1.** Расход воздуха системой вентиляции на каждый тяговый электродвигатель по сериям электровозов

**Table 1.** Ventilation system air flow for electric locomotive series

Серия электровоза Locomotive series	Расход воздуха на тяговом электродвигателе, не менее м <sup>3</sup> /мин. Air flow on traction electric motor, at least m <sup>3</sup> /min.
ВЛ80С, ВЛ80Р	105
ВЛ85	95
2ЭС5К; 3ЭС5К; 4ЭС5К	70

Из табл. 1 видно, что расход воздуха системой вентиляции на тяговые электродвигатели электровозов серий 2,3,4ЭС5К значительно ниже (на 30 %), чем на других сериях электровозов (ВЛ80С, Р и ВЛ85), что обусловлено, скорее всего, желанием уменьшить расход электроэнергии на собственные нужды электровоза.

Таким образом, снижение расхода воздуха на охлаждение тяговых электродвигателей неизбежно приводит к росту температуры их обмоток, градиента температур, в связи с чем могут возникать недопустимые механические напряжения в остовах тяговых электродвигате-

лей, постепенно приводящие к трещинообразованию.

### Оценка градиента температуры и возникающих механических напряжений

Согласно ГОСТ 23207-78 [10] процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению, называется усталостью материала. Малоцикловая усталость – усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит при упругопластическом деформировании. Практикой установлено [11], что если элемент конструкции многократно подвергать переменному нагружению определенного уровня, то после некоторого числа перемен напряжений в нем появится трещина, которая постепенно будет развиваться. В итоге деталь разрушится, не дав при этом заметных остаточных деформаций даже в том случае, когда ее материал высокопластичен.

Свойство материала противостоять усталости называют сопротивлением усталости или выносливостью [10]. Имея величину временного сопротивления разрыву (предел прочности)  $\sigma_b$ , пределы выносливости стали при симметричном цикле можно приблизительно найти по следующим эмпирическим соотношениям [11]: для растяжения – сжатия –  $\sigma_{-1}^{\circ} = 0,28\sigma_b$ , для изгиба –  $\sigma_{-1}^I = 0,4\sigma_b$ , для кручения –  $\tau_{-1} = 0,22\sigma_b$ . Поскольку напряжения сдвига отличаются от напряжений кручения только выбором системы отсчета, можно предположить, что предел выносливости при сдвиге будет примерно тем же, что и при кручении –  $\sigma_{-1}^{сдв} \approx 0,22\sigma_b$ .

Изучение возникающих напряжений в остове тягового электродвигателя разделяется на две задачи – изучение температурного распределения в остове, которое появляется при его нагреве, и изучение механических напряжений, возникающих вследствие тепловых деформаций [12].

Для выявления причин образования трещин была создана упрощенная 3D модель остова тягового электродвигателя НБ-514 (рис. 6). С помощью программного комплекса Femap был проведен тепловой расчет данного остова, а затем прочностной расчет, при котором нагруз-

кой на остов служили рассчитанные ранее значения температуры. При расчетах материалу модели остова тягового электродвигателя были заданы свойства стали марки 25Л, используемой при изготовлении деталей тяговых электродвигателей НБ-514 [7]. Точки закрепления остова стандартные для опорно-осевого подвешивания тягового электродвигателя НБ-514 [7].

Для проведения теплового расчета задана температурная модель нагрева остова тягового

электродвигателя НБ-514 (рис. 7). В зоне расположения обмотки возбуждения двигателя температура задана 180°C и 40°C – в зоне смотрового и вентиляционного окон, что имитирует температуру охлаждающего воздуха системы вентиляции. Температура 180°C выбрана характерной для часового режима работы тягового электродвигателя. Полученная температурная модель является подходящей для решаемой задачи, в которой анализируются механические

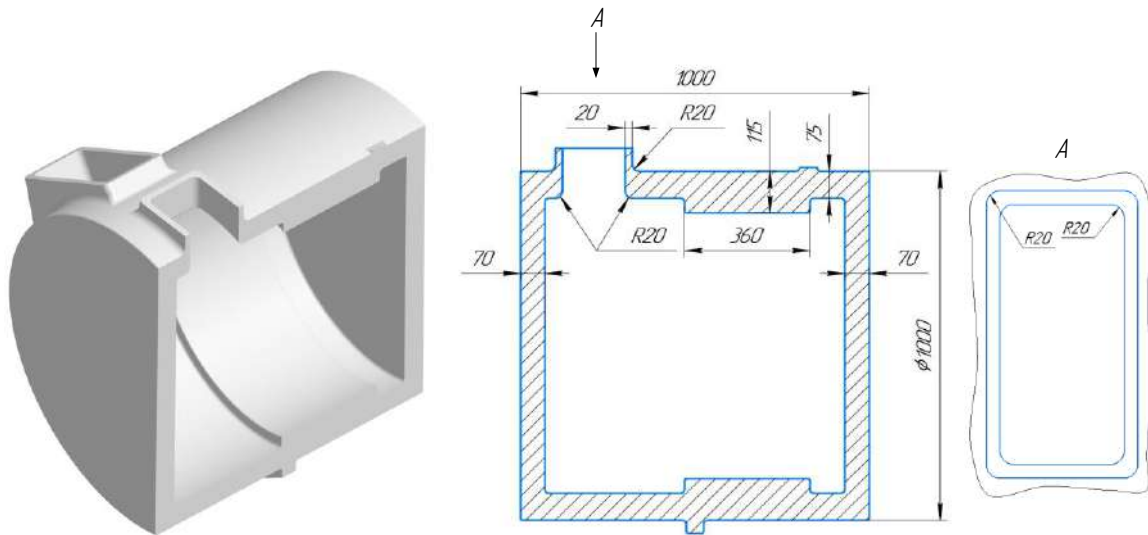


Рис. 6. Упрощенная модель остова тягового электродвигателя НБ-514

Fig. 6. Simplified model of the frame of traction electric motor NB-514

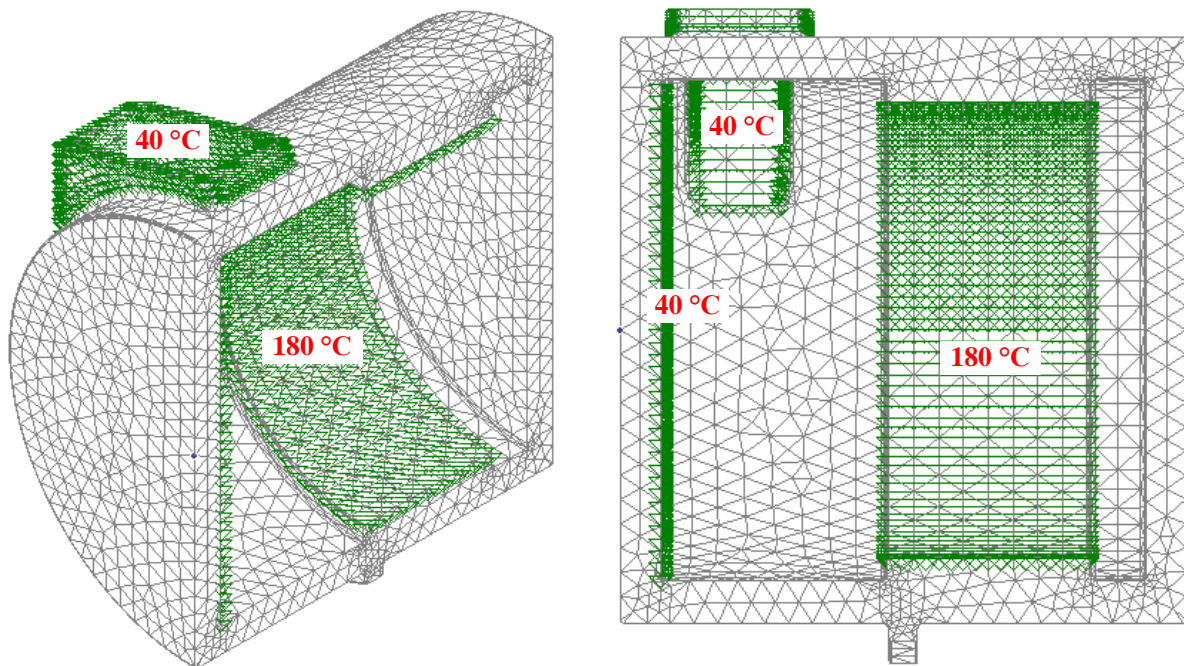


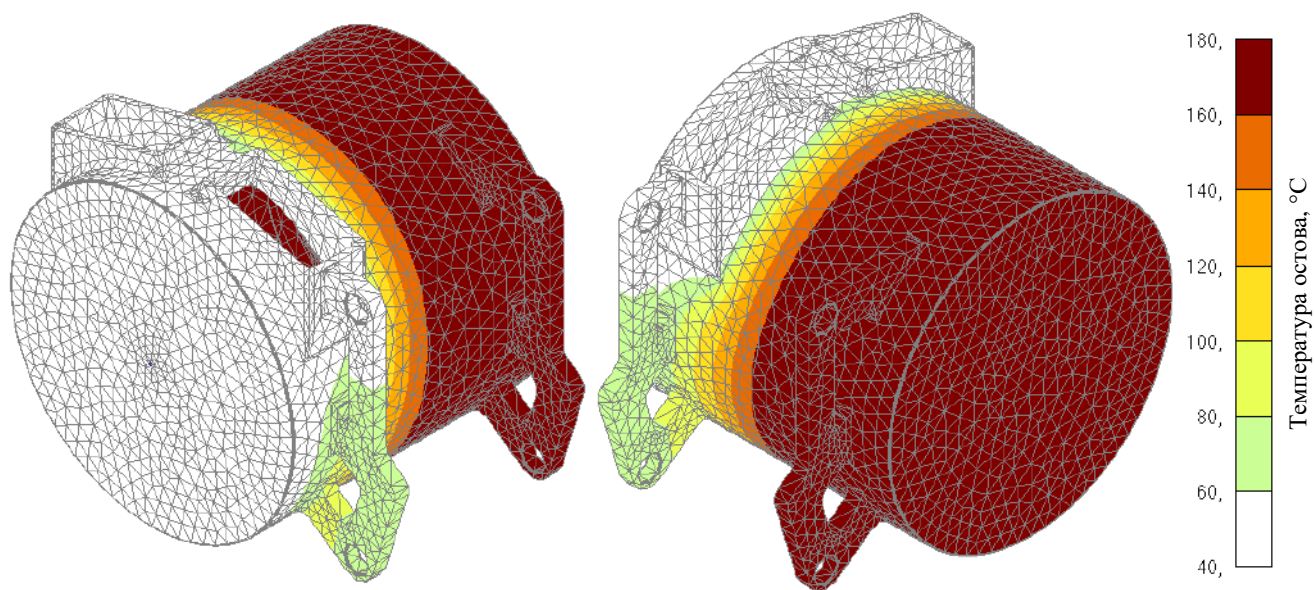
Рис. 7. Заданная температура нагрева остова тягового электродвигателя НБ-514

Fig. 7. Set heating temperature for the frame of NB-514 traction electric motor

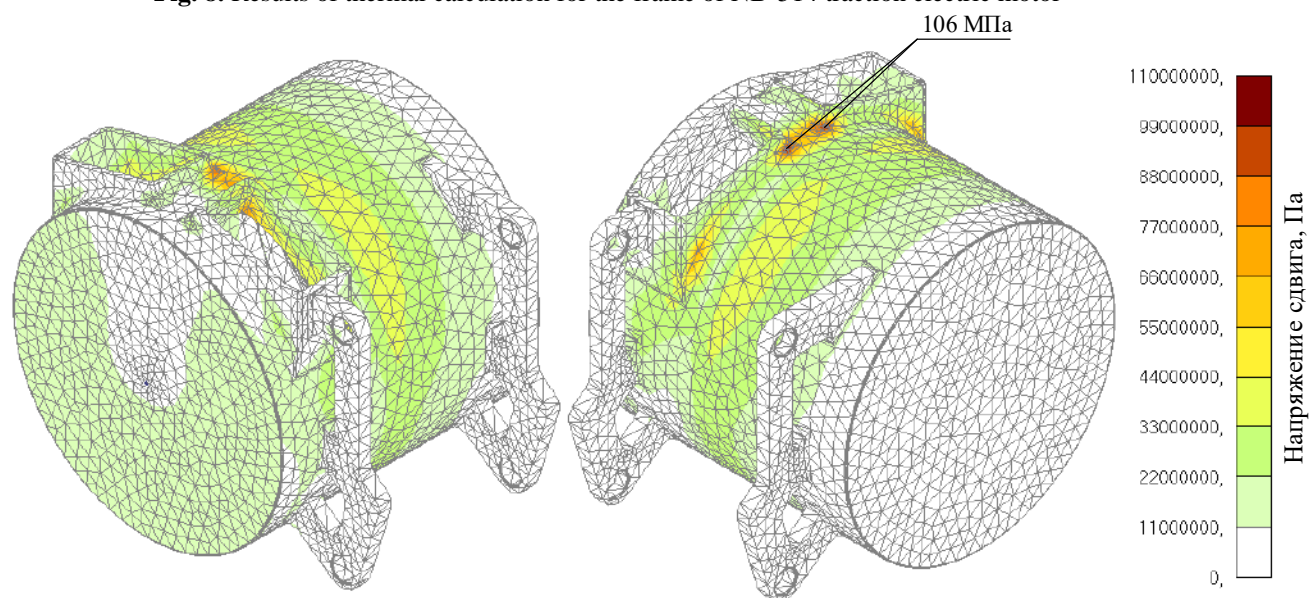
напряжения, возникающие в зоне между вентиляционным и смотровым окнами двигателя вдали от обмоток полюсов. Результаты теплового расчета для превышения температуры обмоток на  $140^{\circ}\text{C}$  представлены на рис. 8.

Следовательно, одной из основных причин образования трещин в остовах тяговых электродвигателей НБ-514 можно считать циклически повторяющиеся температурные напряжения, возникающие из-за неравномерности

распределения температуры. Особенно характерно это для часового режима работы электровоза как в режиме тяги, так и в режиме рекуперативного торможения. Особое значение подобные напряжения имеют для электровозов, постоянно работающих на горно-перевальных участках в качестве электровозов подталкивания [13]. Проведение измерений в зоне возникновения трещин тензометрическим методом практически невозможно из-за геометрии остова.



**Рис. 8.** Результаты теплового расчета остова тягового электродвигателя НБ-514  
**Fig. 8.** Results of thermal calculation for the frame of NB-514 traction electric motor



**Рис. 9.** Результаты прочностного расчета остова тягового электродвигателя НБ-514  
**Fig. 9.** Results of strength calculation for the frame of NB-514 traction electric motor

**Исследование нагрева двигателя на горно-перевальном участке Большой Луг – Слюдянка Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги» в программном комплексе «Кортэс»**

Для математического моделирования зависимости механических напряжений в остовах тягового электродвигателя от его нагрева при движении поезда были проведены тяговые расчеты в программном комплексе «Кортэс» [14]. Профиль пути при расчетах соответствует горно-перевальному участку Большой Луг – Слюдянка, спрямление пути не производилось, кривые учтены в качестве фиктивного подъема [15].

Расчеты проводились для двух серий электровозов – 1,5ВЛ80Р и 3ЭС5К. Параметры тяговых электродвигателей были заданы согласно правилам технических расчетов [15]. Согласно тепловым характеристикам тягового электродвигателя НБ-514, его постоянная времени  $T$  при различных значениях тока двигателя неизменна, что свидетельствует о том, что вентиляторы системы охлаждения при расчете считаются всегда включенными, в том числе в режиме выбега, что не всегда выполняется на практике.

Основной расчет выполнялся для поезда массой 3 400 т, являющейся критической нормой массы поезда для электровозов 1,5ВЛ80Р и 3ЭС5К на участке Иркутск-Сортировочный – Петровский Завод в четном направлении [16] при максимальной допустимой скорости

55 км/ч, которая характерна на горно-перевальных участках с дефектами рельсов типов 40 (волнообразный износ и смятие головки рельса) и 44 (боковой износ головки рельса) [17]. Меньшие и большие веса поезда приняты для справки.

В табл. 2 представлены результаты моделирования, показывающие зависимость превышения температуры обмоток тягового электродвигателя относительно охлаждающего воздуха системы вентиляции от массы поезда. Кроме того, к температуре нагрева двигателя электровозов серии 3ЭС5К относительно окружающей среды следует прибавить примерно 20 °С из-за увеличения температуры воздуха после охлаждения тиристорных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя. Рассчитанные ранее значения механических напряжений в остовах тягового электродвигателя НБ-514 при превышении температуры обмоток относительно охлаждающего воздуха системы вентиляции на 140 °С позволяют определить напряжения в данном остовах при других превышениях температуры обмоток. Соответствующие значения механических напряжений также представлены в табл. 2.

Из представленных данных (см. табл. 2), видно, что остов тягового электродвигателя НБ-514 электровозов серии 2,3,4ЭС5К, согласно расчетам, имеет в среднем на 20 % большие механические напряжения, возникающие при его нагреве, по сравнению с электровозами серии ВЛ80Р. При этом создающиеся механические напряже-

**Таблица 2.** Зависимости превышения температуры обмоток двигателя и механических напряжений в остовах тягового электродвигателя НБ-514 от массы поезда

**Table 2.** Dependences of temperature excess in motor windings and mechanical stresses in the frame of NB-514 electric motor on the train mass

Масса поезда, т	Превышение температуры обмоток двигателя относительно охлаждающего воздуха системы вентиляции, °С		Превышение температуры обмоток двигателя электровоза 3ЭС5К относительно окружающей среды, °С	Напряжения сдвига в остовах тягового электродвигателя $\sigma$ , МПа (доля $\sigma_B$ )	
	1,5ВЛ80Р	3ЭС5К		1,5ВЛ80Р	3ЭС5К
3000	71	85	103	54 (0,14 $\sigma_B$ )	64 (0,16 $\sigma_B$ )
3200	76	90	109	57 (0,14 $\sigma_B$ )	68 (0,17 $\sigma_B$ )
<b>3400</b>	<b>81</b>	<b>95</b>	<b>115</b>	<b>61 (0,15<math>\sigma_B</math>)</b>	<b>72 (0,18<math>\sigma_B</math>)</b>
3600	86	103	124	65 (0,16 $\sigma_B$ )	78 (0,2 $\sigma_B$ )
3800	92	113	135	70 (0,18 $\sigma_B$ )	85 (0,21 $\sigma_B$ )
4000	99	127	151	75 (0,19 $\sigma_B$ )	96 (0,24 $\sigma_B$ )
4200	109	146	173	82 (0,21 $\sigma_B$ )	110 (0,28 $\sigma_B$ )
4400	124	185	215	94 (0,24 $\sigma_B$ )	140 (0,35 $\sigma_B$ )

ния пропорциональны превышению температуры обмоток относительно охлаждающего воздуха системы вентиляции и также пропорциональны квадрату массы поезда, т. е. при увеличении массы поезда они значительно возрастают, что также приводит к трещинообразованию.

В данных расчетах учитывались только температурные напряжения в остовах тягового электродвигателя, но не учитывались напряжения, возникающие при механической работе двигателя, а также вибрации, появляющиеся при взаимодействии колеса и рельса. При этом стоит отметить, что жесткость рельсового пути, начиная с 2001 и по 2012 гг. выросла до четырех раз в летнее время года и до пяти раз в зимнее время года [18], что обусловлено переходом с деревянных шпал на железобетонные. В этом случае возросшие вибрации при взаимодействии колеса и рельса являются еще одной причиной трещинообразования в остовах тяговых электродвигателей современных отечественных электровозов.

Величина только температурных напряжений превышает предел выносливости стали остова тягового электродвигателя, что подтверждает основную причину и объем (80 %) трещинообразования остовов тяговых электродвигателей электровозов серий 2,3,4ЭС5К по сравнению с другими сериями. Таким образом, возникающие температурные напряжения необходимо значительно уменьшать, что возможно путем улучшения системы принудительной вентиляции двигателей и за счет изменения геометрической формы вентиляционного и смотрового окон остова тягового электродвигателя [12, 13].

## Заключение

В настоящее время существует проблема значительного количества трещинообразования в остовах тяговых электродвигателей современных отечественных электровозов. Практически каждый третий остов электродвигателя электровоза в эксплуатации имеет трещинообразование.

Большую часть отказов (80 %) остовов электродвигателей имеют электровозы серии 2,3,4ЭС5К.

Выявлено, что расход воздуха системой вентиляции на тяговые электродвигатели электровозов серий 2,3,4ЭС5К значительно ниже ( $70 \text{ м}^3/\text{мин}$ ), чем на других сериях электровозов – ВЛ80С, Р и ВЛ85 (соответственно 105 и  $95 \text{ м}^3/\text{мин}$ ).

Выполнено моделирование в программном комплексе Femap, что позволило установить одну из основных причин трещинообразования в остовах тяговых электродвигателей – наличие температурных напряжений (106 МПа), вызванных воздействием малоциклового усталости стали остова тягового электродвигателя, и превышающих предел выносливости стали.

Результаты моделирования показали зависимость величины механических напряжений в остовах тягового электродвигателя НБ-514 от массы поезда. Выявлено, что остов тягового электродвигателя электровозов серии 3ЭС5К имеет примерно на 20 % большие механические напряжения, возникающие из-за перегрева, по сравнению с электровозами серии 1,5ВЛ80Р.

Дополнительные значения напряжений в остовах тяговых электродвигателей образуются и от вибраций при механической работе тягового электродвигателя и при взаимодействии колеса и рельсового пути. Жесткость рельсового пути значительно выросла из-за перехода с деревянных шпал на железобетонные. Это позволило сформулировать еще одну причину трещинообразования в остовах тяговых электродвигателей современных отечественных электровозов.

Для уменьшения трещинообразования в остовах тягового электродвигателя НБ-514 авторами предлагается либо увеличить расход воздуха системой вентиляции, либо изменить формы вентиляционного и смотрового окон остова данного двигателя.

С целью подтверждения основных причин трещинообразования требуется проведение эксплуатационных испытаний электровоза с замером температуры нагрева остова тягового электродвигателя и возникающих в нем вибраций, вызывающих недопустимые механические напряжения.

## Список литературы

1. Зябиров Х.Ш. Система «колесо-рельс»: оптимальное взаимодействие // Евразия Вести : электрон. газета. 2004. № 4. URL: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2004-06a01> (дата обращения: 20.01.2022).

2. Киселев М.Д. Автоматическое управление скоростью грузового поезда при использовании распределенной тяги : дис. ... канд. техн. наук. М. : МИИТ, 2019. 205 с.
3. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У.Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Ландарен. М. : Интекст, 2002. 408 с.
4. Электровоз ВЛ80С : руководство по эксплуатации / Н.М. Васько, Н.П. Козельский, А.А. Матлахов и др. М. : Транспорт, 1982. 622 с.
5. Электровоз ВЛ80Р : руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов, Н.М. Васько, В.И. Покромкин и др. М. : Транспорт, 1985. 541 с.
6. Электровоз ВЛ85 : руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов, Н.Г. Пушкарев, Л.А. Позднжова и др. М. : Транспорт, 1992. 480 с.
7. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К) : руководство по эксплуатации : в 2 т. Новочеркасск, 2007. 2 т.
8. Каталог электродвигателей // Новочеркасский электровозостроительный завод : сайт. URL: <https://nevz.com/catalogue/catalogue.pdf> (дата обращения: 21.01.2022).
9. Улан-Удэнский ЛВРЗ в 2018 году освоил выпуск новой продукции // ЛокоТех : сайт. URL: <https://www.locotech.ru/press-center/news/2724/> (дата обращения: 21.01.2022).
10. ГОСТ 23207-78. Сопrotivление усталости. Основные термины, определения и обозначения. Введ. 1979–01–01. М. : Изд-во стандартов, 1981. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009488> (дата обращения: 28.01.2022).
11. Писаренко Г.С. Сопrotivление материалов. Киев : Вища школа, 1979. 696 с.
12. Портной А.Ю., Селедцов К.П., Мельниченко О.В. Математическое моделирование механических напряжений, возникающих при неравномерном нагреве остова тягового электродвигателя НБ-514 и совершенствование его конструкции // Изв. Транссиба. 2021. № 2 (46). С. 13–23.
13. Математическое моделирование механических напряжений, возникающих при неравномерном нагреве остова тягового электродвигателя НБ-514 / А.Ю. Портной, К.П. Селедцов, О.В. Мельниченко и др. // Молодая наука Сибири : электрон. науч. журн. 2021. № 1 (11). URL: <https://mnv.irkgups.ru/matematiceskoe-modelirovanie-mehaniceskikh-napryazheniy-voznikayushchih-pri-neravnomernom-nagreve> (дата обращения: 22.02.2022).
14. Программное обеспечение, подготовка данных для тяговых и электрических расчетов // Studbooks.net : сайт. URL: [https://studbooks.net/1941590/matematika\\_himiya\\_fizika/programmnoe\\_obespechenie\\_podgotovka\\_dannyh\\_tyagovyh\\_elektricheskikh\\_raschetov](https://studbooks.net/1941590/matematika_himiya_fizika/programmnoe_obespechenie_podgotovka_dannyh_tyagovyh_elektricheskikh_raschetov) (дата обращения: 01.02.2022).
15. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы : распоряжение ОАО «РЖД» 867р от 12.05.2016 : в ред. от 02.02.2018. М. : ОАО «РЖД», 2016. 515 с.
16. Об установлении норм масс и длин пассажирских и грузовых поездов на участках, обслуживаемых Восточно-Сибирской дирекцией тяги : приказ Дирекции тяги от 02.12.2020 № ЦТ-224. URL: <ftp://09272071.com/docs/%D0%A6%D0%A2-224.pdf> (дата обращения: 01.02.2022).
17. Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов : инструкция утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014 № 2499р. URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/144> (дата обращения: 17.01.2022).
18. Певзнер В.О., Косарев А.Б. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности. М. : ВНИИЖТ, 2016. 97 с.

### References

1. Zyabirov Kh.Sh. Sistema «koleso-rel's»: optimal'noe vzaimodeistvie (Elektronnyi resurs) [Wheel-rail system: optimal interaction (Electronic resource)]. Available at: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2004-06a01> (Accessed January 20, 2022).
2. Kiselev M.D. Avtomaticheskoe upravlenie skorost'yu gruzovogo poyezda pri ispolzovanii raspredelennoi tyagi [Automatic speed control of a freight train using distributed traction]. PhD's thesis. Moscow, 2019. 205 p.
3. Harris U.J., Zaharov S.M., Landaren J., Torne H., Ebersen V. Obobshchenie peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeistviya kolesa i rel'sa [Summarized Best Practices of Heavy Traffic: Issues of Wheel-Rail Interaction]. Moscow: Intekst Publ., 2002. 408 p.
4. Vasko N.M., Kozel'skii N.P., Matlakhov A.A. et al. Elektrovoz VL80S. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electric locomotive VL80S. Manual]. Moscow: Transport Publ., 1982. 622 p.
5. Tushkanov B.A., Vasko N.M., Pokromkin V.I. et al. Elektrovoz VL80R. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electric locomotive VL80R. Manual]. Moscow: Transport Publ., 1985. 541 p.
6. Tushkanov B.A., Pushkarev N.G., Pozdnzhova L.A. et al. Elektrovoz VL85. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electric locomotive VL85. Manual]. Moscow: Transport Publ., 1992. 480 p.
7. Elektrovoz magistralnyi 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Manual]. Novocherkassk, 2007. Vol. 1. 635 p. Vol. 2. 640 p.
8. Katalog elektrodvigateli (Elektronnyi resurs) [Catalog of electric motors (Electronic resource)]. Available at: <https://nevz.com/catalogue/catalogue.pdf> (Accessed January 21, 2022).
9. Ulan-Udenskii LVRZ v 2018 godu osvoil vypusk novoi produktsii (Elektronnyi resurs) [Ulan-Ude LVRZ mastered the production of new products in 2018 (Electronic resource)]. Available at: <https://www.locotech.ru/press-center/news/2724/> (Accessed January 21, 2022).
10. GOST 23207-78. Soprotivlenie ustalosti. Osnovnye terminy, opredeleniya i oboznacheniya (Elektronnyi resurs) [State Standard 23207-78. Fatigue strength. Terms, definitions and symbols (Electronic resource)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200009488> (Accessed January 28, 2022).

11. Pisarenko G.S. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. Kiev: Vysshaya shkola Publ., 1979. 696 p.
12. Portnoi A. Y., Seledtsov K. P., Melnichenko O. V. Matematicheskoe modelirovanie mekhanicheskikh napryazhenii, voznikayushchikh pri neravnomernom nagreve ostova tyagovogo elektrodvigatelya NB-514 i sovershenstvovanie ego konstruktssii [Mathematical simulation of mechanical stresses arising at uneven heating of the traction electric motor NB-514 and improvement of its design]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2021, no. 2(46), pp. 13–23.
13. Portnoi A.Yu., Seledtsov K.P., Mel'nichenko O.V., Ivanov V.N. Matematicheskoye modelirovaniye mekhanicheskikh napryazhenii, voznikayushchikh pri neravnomernom nagreve ostova tyagovogo elektrodvigatelya NB-514 [Mathematical simulation of mechanical stresses arising at uneven heating of the traction electric motor NB-514]. *Molodaya nauka Sibiri: elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal]. 2021, no. 1(11). Available at: <https://mnv.irkups.ru/matematicheskoe-modelirovanie-mekhanicheskikh-napryazheniy-voznikayushchih-pri-neravnomernom-nagreve> (Accessed February 22, 2022).
14. Programmnoye obespecheniye, podgotovka dannykh dlya tyagovykh i elektricheskikh raschetov (Elektronnyi resurs) [Software, data preparation for traction and electrical calculations (Electronic resource)]. Available at: [https://studbooks.net/1941590/matematika\\_himiya\\_fizika/programmnoe\\_obespechenie\\_podgotovka\\_dannyh\\_tyagovykh\\_elektricheskikh\\_raschetov](https://studbooks.net/1941590/matematika_himiya_fizika/programmnoe_obespechenie_podgotovka_dannyh_tyagovykh_elektricheskikh_raschetov) (Accessed February 1, 2022).
15. Rasporyazhenie OAO «RZhD» 867r ot 12.05.2016 (red. 02.02.2018) «Ob utverzhdenii pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» [Order of JSC «Russian Railways» 867r dated 12.05.2016 (ed. 02.02.2018) «On approval of the rules of traction calculations for train work»]. Moscow: RZhD Publ., 2016. 515 p.
16. Prikaz Direktsii tyagi ot 02.12.2020 № TsT-224 «Ob ustanovlenii norm mass i dlin passazhirskikh i gruzovykh poezdov na uchastkakh. obsluzhivayemykh Vostochno-Sibirskoi direktsiei tyagi» (Elektronnyi resurs) [Order of the Traction Directorate dated December 2, 2020 no TsT-224 «On the establishment of norms for the masses and lengths of passenger and freight trains on sections served by the East Siberian Traction Directorate» (Electronic resource)]. Available at: <ftp://09272071.com/docs/%D0%A6%D0%A2-224.pdf> (accessed February 1, 2022).
17. Instruktsiya «Defekty relsov. Klassifikatsiya. katalog i parametry defektnykh i ostrodefektnykh relsov». utverzhennaya rasporyazheniyem OAO «RZhD» ot 23.10.2014 № 2499r (Elektronnyi resurs) [Instruction «Rail Defects. Classification, catalog and parameters of defective and sharply defective rails», approved by order of Russian Railways OJSC dated October 23, 2014 no 2499r (Electronic resource)]. Available at: <https://www.tdesant.ru/info/item/144> (Accessed January 17, 2022).
18. Pevzner V.O., Kosarev A.B. Metodika otsenki vozdeistviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya nadezhnosti [Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track according to the conditions for ensuring reliability]. Moscow: VNIIZHT Publ., 2016. 97 p.

### Информация об авторах

**Портной Александр Юрьевич**, д-р физ. - мат. наук, доцент, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: portnoi\_alexander@mail.ru.

**Сеledgeв Константин Павлович**, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kostyans7kss@gmail.com.

**Мельниченко Олег Валерьевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

**Мищенко Максим Вальдемарович**, аспирант кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: reydersp@mail.ru.

### Information about the authors

**Alexander Yu. Portnoi**, Doctor of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrument Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: portnoi\_alexander@mail.ru.

**Konstantin P. Seledtsov**, Ph.D. student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kostyans7kss@gmail.com.

**Oleg V. Mel'nichenko**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

**Maksim V. Mishchenkov**, Ph.D. student of the Department of Physics, Mechanics and Instrument Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: reydersp@mail.ru.



## Факторы повышения современного уровня технического состояния железнодорожной инфраструктуры

Н.И. Коваленко✉, Н.А. Коваленко

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

✉kni50@mail.ru

### Резюме

В статье отмечается, что, несмотря на принимаемые меры по снижению изломов рельсов, в отдельных дирекциях инфраструктуры ОАО «Российские железные дороги», интенсивной работы по предупреждению нарушений не проводится, должных выводов не делается. Для примера оценки текущего состояния путевого хозяйства рассмотрен инцидент в виде схода поезда, произошедшего 16 марта 2021 г. на перегоне Южно-Уральской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги». Данное событие отнесено к материалам по неудовлетворительному состоянию рельсов, изолирующих стыков (в том числе АпАТэК) и путевого хозяйства инфраструктурного комплекса в целом. С помощью выполненного моделирования и произведенных расчетов выявлено, что коэффициент запаса прочности по напряжениям в наиболее нагруженном сечении рельса равен 1,7 при жестком (стабилизированном) подрельсовом основании, при слабом (мягком, сразу после ремонта) подрельсовом основании его величина составила 1,3. В случае разрушения принимающей шпалы или ее отсутствия, коэффициент запаса прочности по напряжениям в наиболее нагруженном сечении составил 0,82 как при слабом, так и при жестком подрельсовом основании. В результате проведенных исследований установлено, что стратегической задачей повышения эксплуатационной надежности пути является достижение равноресурсности в эксплуатации его элементов. Следует отказаться от стратегии планирования промежуточных ремонтов «по фактическому состоянию», в первую очередь на участках первого и второго классов, с разработкой для них периодичности ремонтов по наработке тоннажа или времени эксплуатации.

### Ключевые слова

равноресурсность элементов пути, излом рельсов, принимающая шпала, изолирующий стык, подрельсовое основание, запас прочности по напряжениям, пропущенный тоннаж, особогруженонапряженные участки, балластный слой, планово-предупредительная выправка

### Для цитирования

Коваленко Н.И. Факторы повышения современного уровня технического состояния железнодорожной инфраструктуры / Н.И. Коваленко, Н.А. Коваленко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 112–120. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).112-120.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 4.05.2022 г.; поступила после рецензирования: 23.05.2022 г.; принята к публикации: 24.05.2022 г.

## Factors of increasing the current level of technical condition of the railway infrastructure

N.I. Kovalenko✉, N.A. Kovalenko

Russian University of transport (MIET), Moscow, the Russian Federation

✉kni50@mail.ru

### Abstract

In the article it is noted that, despite the measures taken to reduce rail fractures in certain Directorates of the infrastructure of JSC «Russian Railways», intensive work to prevent violations is not carried out, proper conclusions not made. As an example of assessing the current state of the track economy, a train derailment incident that occurred on March 16, 2021 on the stretch of the South Ural Railway – a branch of JSC «Russian Railways», is considered. The event is classified as the materials on unsatisfactory rail condition, insulating joints (including АпАТэК) and track facilities of the infrastructure complex as a whole. The performed modeling and calculations, revealed that the stress safety factor in the most loaded section of the rail was 1.7 for a rigid (stabilized) sub-rail base, whereas for a weak (soft, immediately after repair) sub-rail base, its value was 1.3. In case of destruction or absence of the receiving sleeper, the stress safety factor in the most loaded section was 0.82 for both weak and rigid sub-rail base. Based on the conducted research, it has been established that the strategic objective of improving the operational reliability of the track is to achieve equal resource in the operation of its elements. It is necessary to abandon the strategy of planning intermediate repairs "according to the actual condition", primarily on the first and second class sections, with the frequency of repairs worked out for them according to the tonnage run or operating time.

**Keywords**

tequivalence of track elements, rail breakage, receiving sleeper, insulating joint, sub-rail base, stress safety margin, throughput tonnage, especially load-stressed sections, ballast layer, planned and preventive straightening

**For citation**

Kovalenko N.I., Kovalenko N.A. Faktory povysheniya sovremennogo urovnya tekhnicheskogo sostoyaniya zheleznodorozhnoi infrastruktury [Factors of increasing the current level of technical condition of the railway infrastructure]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 112–120.– DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).112-120.

**Article Info**

Received: May 4, 2022; revised: May 23, 2022; accepted: May 24, 2022.

**Введение**

Руководством ОАО «Российские железные дороги» (РЖД) в настоящее время отмечается, что в путевом хозяйстве инфраструктурного комплекса сложилась тревожная обстановка с изломами рельсов. По состоянию на 13 марта 2021 г. на сети железных дорог были допущены 70 случаев изломов рельсов (за аналогичный период 2020 г. – 42 случая). В их числе 28 изломов сварных стыков, выполненных алюминотермитным способом сварки (в 2020 г. было 8 случаев). В телеграмме от 13 марта 2021 г. отмечается увеличение количества сходов подвижного состава на сети ОАО «РЖД» по причинам разрушения рельсов, изолирующих стыков с накладками АпАТЭК, сварных стыков, выполненных алюминотермитным способом и других причин.

Отмечается, что в течение первого квартала 2021 г. в ОАО «РЖД» было допущено 5 случаев схода подвижного состава в результате разрушения рельсов в зоне изолирующих стыков с накладками АпАТЭК. В телеграмме указывается, что отдельными Дирекциями инфраструктуры, несмотря на принимаемые меры по стабилизации ситуации по снижению изломов рельсов, фактической интенсивной работы по устранению нарушений не проводится, должных выводов не делается.

Таким образом, сложившееся на сети железных дорог ОАО «РЖД» положение по состоянию путевого хозяйства, в частности рельсов, в настоящее время имеет тенденцию к ухудшению.

**Материалы и методы**

В качестве примера оценки текущего состояния путевого хозяйства рассмотрим инцидент в виде схода поезда 16 марта 2021 г. на перегоне Южно-Уральской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» и предшествовавших ему при-

чин. Данное событие следует отнести к материалам по неудовлетворительному состоянию рельсов, изолирующих стыков, в том числе АпАТЭК, и инфраструктурного комплекса в целом.

Комиссией ОАО «РЖД» по данному инциденту установлено, что причиной схода вагонов, произошедшей 16 марта 2021 г. на перегоне Южно-Уральской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» явился излом рельса в сечении, где расположено отверстие диаметром 22 мм на расстоянии 60 см от торца рельса в изолирующем стыке, с последующими дополнительными изломами рельса и его разрушением на большое количество кусков (найлены 37 фрагментов, но это не полное их количество) на длине около 4 м (рис. 1).



**Рис. 1.** Фрагменты разрушения рельса после схода (16 марта 2021 г.)

**Fig. 1.** Rail failure fragments after derailment (March 16, 2021)

Участок пути, где произошел сход, имеет следующие характеристики: класс линии – 2; класс пути – 3; специализация – О (особогрузонапряженная); путь уложен при модернизации линии в 2013 г. Пропущенный тоннаж по рассматриваемому пути на момент произошедшего схода составил 766,0 млн т брутто. Грузонапряженность линии 96,524 млн ткм брутто/км в год.

Характеристика рельса, разрушившегося в результате схода поезда: тип рельса Р65; завод-изготовитель АО «ЕВРАЗ ЗСМК»; дата проката рельса – январь 2013 г. (на шейке рельса указано К 1 2013); категория рельса – ДТ350; износ головки рельса: вертикальный – 2,5 мм, боковой по рабочей грани – 14 мм.

На данном участке с 2017 г. не был выполнен средний ремонт пути, который требовалось запланировать в соответствии с п. 12 Приложения № 1 Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (далее – ПТЭ), утвержденных Министерством транспорта Российской Федерации от 21 декабря 2010 г. № 286 с изменениями в соответствии с Приказом Минтранса РФ от 9 февраля 2018 г. № 54.

На примыкающих концах рельса, на котором смонтирован изолирующий стык, была нарушена эпюра шпал (в сторону ее увеличения), которая предусматривается в соответствии с п. 3.11.10 и п. 3.11.11 Инструкции по

текущему содержанию пути, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 14 ноября 2016 г. № 2288р». Предстыковая шпала с отдающего конца рельса имела раскол.

Примерно за два месяца до схода, т. е. 6 января 2021 г., при производстве зимнего комиссионного осмотра на данном участке были выявлены замечания в виде угла в плане 36 мм на длине 24 м и свехнормативного зазора 26 мм в изолирующем стыке по левой рельсовой нити (на которой в дальнейшем произошел сход подвижного состава). Эти неисправности, согласно акту комиссии ОАО «РЖД», были устранены.

Приблизительно за месяц до схода, то есть 8 февраля 2021 г., при рабочем проходе диагностического комплекса «ЭРА» на данном участке (в частности на исследуемом километре) были обнаружены неисправности в виде бокового износа рабочей грани рельса от 16,6 мм до 19,5 мм, что соответствует оценке «неудовлетворительно».

На этом же участке пути 22 февраля 2021 г., затем 7 марта 2021 г. производились работы по замене упругой прокладки на промежуточных скреплениях ЖБР-65 ПШМ, которые уложены на этом участке пути. Далее, 10 марта 2021 г. здесь же выполнялись работы по регулировке ширины колеи.

В материалах расследования и отчетах по

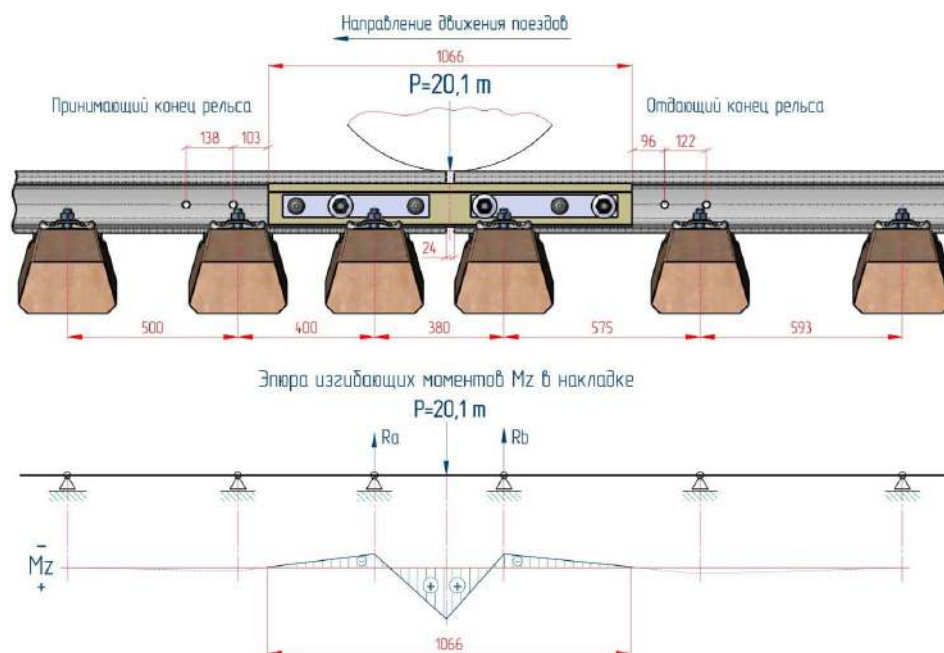


Рис. 2. Расчетная схема места разрушения рельса при сходе вагонов 16 марта 2021 г. при неразрушенной шпале

Fig. 2. Calculated scheme of the rail failure area after the March 16, 2021 derailment with the sleeper undestroyed

текущему содержанию участка пути, где произошел сход, в журнале учета работ текущего содержания, оценке состояния пути и путевых устройств отсутствуют материалы, в которых указано о выполнении работ по осмотру данного изолирующего стыка АпАТЭК со снятием накладок.

## Результаты

Для установления возможных причин схода подвижного состава, произошедшего 16 марта 2021 г. на перегоне Южно-Уральской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», исследовано, какие эпюры растягивающих и сжимающих напряжений должны быть в головке и подошве рельса при его изломе, зафиксированном на фото (рис. 1), а также в композитных накладках при их изломе, отмеченных в Акте комиссией ОАО «РЖД» по данному событию, при неразрушенной и разрушенной шпале под принимающим рельсом.

Выполненным моделированием [1, 2] и произведенными расчетами [3, 4] установлено, что максимальный изгибающий момент возникает при неразрушенной шпале в сечении по оси шпального ящика между принимающей и

отдающей шпалами (рис. 2).

Под головкой рельса будет растянутая зона (на схеме обозначена знаком плюс), под подошвой рельса – сжатая зона (на схеме указана в виде знаков «минус»). В сечении расположения зазора стыка изгибающий момент и напряжения невелики и соответствуют нормативным значениям.

Расчетами установлено, что коэффициент запаса прочности по напряжениям в наиболее нагруженном сечении композитных накладок по оси принимающей шпалы составил при слабом (мягком) подрельсовом основании 1,3, при жестком – 1,7.

Выполнено аналогичное моделирование и произведенные расчеты при эксплуатации пути с разрушенной шпалой под принимающим концом рельса. Максимальный изгибающий момент действует в сечении по оси принимающей шпалы (или ее условном расположении). В данном сечении возникают напряжения, превышающие нормативные значения.

При разрушенной шпале под принимающим концом рельса (рис. 3) под головкой рельса будет сжатая зона, под подошвой отдающего конца рельса – растянутая зона.

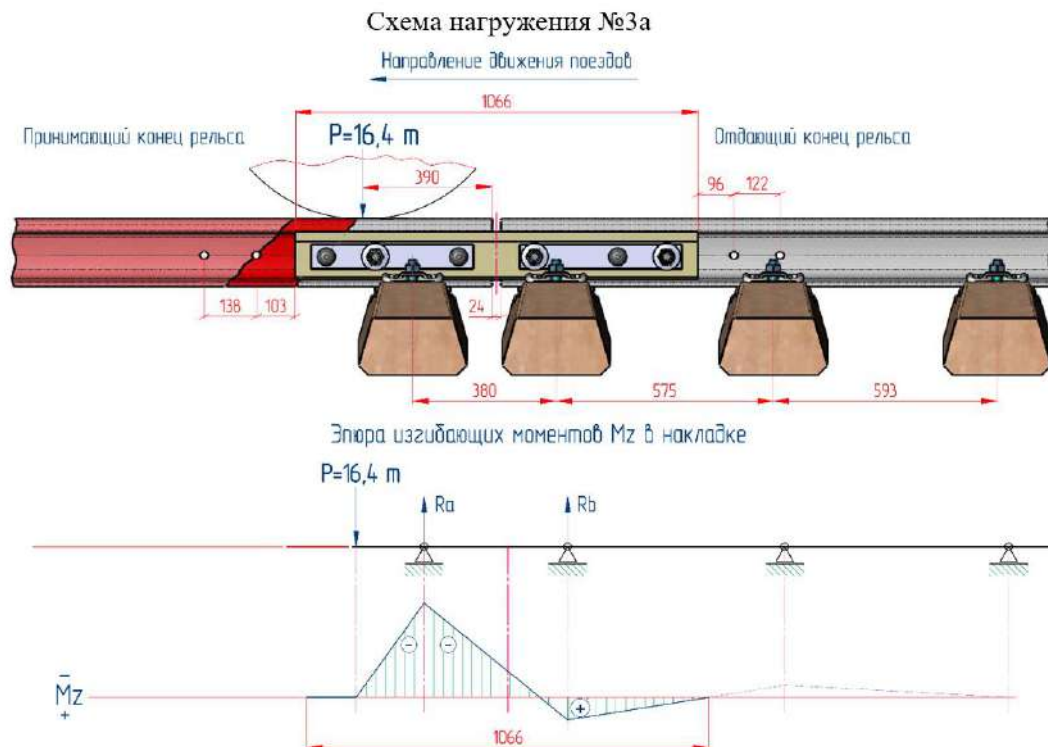


Рис. 3. Расчетная схема места разрушения рельса при сходе вагонов 16 марта 2021 г. при разрушенной шпале

Fig. 3. Calculated scheme of the rail failure area after the March 16, 2021 derailment with the sleeper destroyed

В ослабленном сечении четвертого отверстия в накладках (при счете слева направо) изгибающий момент меньше, чем по оси отдающей шпалы, однако здесь меньше и момент сопротивления сечения накладок.

В случае разрушения принимающей шпалы, коэффициент запаса прочности по напряжениям в наиболее нагруженном сечении композитных накладок по оси отдающей шпалы составил 0,82 как при слабом, так и при жестком подрельсовом основании (принимающая шпала отсутствует).

На разработанной модели (см. рис. 3) при разрушении принимающей шпалы (или ее отсутствии) надрыв накладок изолирующего стыка прогнозируется в ослабленном болтовым отверстием сечении, расположенном на расстоянии, порядка, 48 мм от оси шпалы.

### Обсуждение результатов

Для выяснения возможной причины схода подвижного состава, произошедшего 16 марта 2021 г., были исследованы следующие вопросы:

1. При какой величине упругой просадки рельсов, уложенных на шпалах с расчетным модулем упругости подрельсового основания, произойдет излом композитных накладок от вертикальной нагрузки?

2. Каково значение данной вертикальной нагрузки?

При проведении исследований и выполнении расчетов рассматриваются схемы нагружения и эпюры изгибающих моментов в рельсах и накладках, приведенные на расчетных схемах рис. 2 и 3. Значения модулей упругости подрельсового основания принимаются равными: 23 МПа при слабом или мягком основании (при разрушенной шпале) и 121 МПа при жестком основании (при не разрушенной шпале). Установлено, что для достижения предельных напряжений в композитных накладках от воздействия вертикальных сил давления колес на рельсы в зоне стыка, необходимо приложить силу 86,4 тс от одного колеса или 172,8 тс от колесной пары при слабом основании. При жестком основании соответственно 129,0 тс от одного колеса или 258 тс от колесной пары при не разрушенных шпалах и не изломанных рельсах. Вертикальные прогибы головки рельса по оси стыка составят в случае подрельсового основания с жесткостью 23 МПа 36 мм, при

жесткости основания 121 МПа – 24 мм.

В процессе исследований ставилась задача определить соотношение расчетной величины нагрузки, при которой возможен излом накладок и фактически реализуемой в стыковой зоне при осевых нагрузках 25 тс.

Замечено, что при расчетной динамической силе от колесной пары с осевой нагрузкой 25 тс (от колеса – 12,5 тс) в зоне стыкового зазора с учетом ударного воздействия составит на одно колесо 20,1 тс (см. рис. 2). Соотношение фактически действующих сил и сил, приводящих к излому накладок, составит:  $86,4 / 20,1 = 4,3$  раза при слабом основании и  $129,0 / 20,1 = 6,4$  раза при жестком основании.

Таким образом, для излома композитных накладок от воздействия вертикальных сил от колес на рельсы в зоне стыка при не разрушенных шпалах и не изломанных рельсах необходимо приложить силы соответственно в 4,3 и 6,4 раза превышающие реализуемые при осевых нагрузках 25 тс при слабом и жестком основании.

В результате исследований и выполненных расчетов обнаружено, что наиболее вероятная причина схода вагонов, произошедших 16 марта 2021 г. на Южно-Уральской железной дороге – излом рельса в районе первого отверстия под перемычку диаметром 22 мм. Причиной излома являются процессы усталостной деградации рельсовой стали, так как фактический пропущенный тоннаж по рельсам составил более 766 млн. т брутто при нормативной величине 700 млн. т брутто. Нормативный тоннаж указан в соответствии с правилами технической эксплуатации.

По итогам расследования комиссией ОАО «РЖД» было установлено, что на данном участке с 2017 г. не выполнялся средний ремонт пути, была нарушена эпюра шпал (в сторону ее увеличения), были выявлены замечания в виде углов в плане, наличие свехнормативных зазоров в изолирующем стыке, наличие негодных шпал и креплений, загрязненность и засоренность балласта и другие неисправности.

Утверждено стратегической задачей увеличение эксплуатационной надежности пути, в том числе рельсов, посредством повышения ресурсов работы его элементов для достижения их равноресурсности в эксплуатации [5, 6].

В технических условиях на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту желез-

железнодорожного пути и Паспорте параметров железнодорожного пути и показателей его функционирования нормативная потребность работ по капитальному ремонту пути для каждого участка с различной грузонапряженностью и установленными скоростями движения поездов, определяющими класс пути, рассчитывается по формуле:

$$W_{norm} = \frac{L_i \times G_{god}}{Q_{norm} \times f_i} = \frac{L_i}{N_{god} \times f_i}$$

где  $W_{norm}$  – нормативная потребность работ, км;  $G_{god}$  – грузонапряженность, млн. ткм брутто/км в год;  $Q_{norm}$ ,  $N_{god}$  – тоннаж в млн. т брутто или количество лет, соответствующие нормативному периоду между капитальными ремонтами пути;  $L_i$  – развернутая длина участка пути данного класса, км;  $f_i$  – коэффициент, учитывающий дополнительные эксплуатационные факторы, например, наличие средней длины плетей меньше нормативной; наличие на участках недостаточной толщины чистого щебня; невыполнение шлифовки рельсов; близость мест погрузки угля или руды и другие. Численные значения приведенных выше величин берутся из технического паспорта дистанции пути.

Потребный объем работ разных видов ( $V_i$ ) по участкам определяются по формуле:

$$V_i = w_{kap} \times n_i$$

где  $w_{kap}$  – нормативная потребность работ по капитальному ремонту пути;  $n_i$  – количество повторений работ различного вида за период между капитальными ремонтами пути.

Схема планирования ремонтов от капитального до капитального, представляет собой жизненный цикл работы пути [7–9].

Рекомендации жизненного цикла работы железнодорожного пути на особогрузонапряженных участках (О), согласно правилам технической эксплуатации

Life cycle recommendations for the railway track functioning on the especially load-stressed sections (O), according to the technical maintenance rules

Продление жизненного цикла элементов конструкции пути и повышение их надежности возможно за счет оптимизации ремонтных схем и своевременного выполнения планируемых ремонтов, что приведет к снижению затрат на текущее содержание, позволит в целом уменьшить затраты на материалы и снизить трудозатраты [10–12].

Важнейшей операцией продления сроков работы балластного слоя является его своевременная очистка и пополнение образовавшегося дефицита новым балластом [13, 14]. Результаты исследований научных работников и специалистов железнодорожного транспорта [15, 16] свидетельствуют, что для восстановления максимальной работоспособности балласта необходимо производить средние ремонты (С), или (РС), т. е. капитальные ремонты III-го уровня [17]. В качестве других видов необходимых промежуточных ремонтов предусматриваются подъемочный ремонт (П) и планово-предупредительный ремонт (В). Основные рекомендации приведены в табл.

Исследованиями [18] уровня загрязнения балласта частицами фракции менее 25 мм на полигоне Западно-Сибирской магистрали показали, что он существенно увеличивается при пропуске тоннажа до 200 млн. т брутто. Далее наблюдается, практически, равномерный рост загрязнения балласта, до наработки тоннажа порядка 1 200 млн. т брутто. Например, установлено, что, при тоннаже порядка 700 млн. т брутто загрязненность балласта составляет порядка 28 %, а при пропущенном тоннаже 1 200 млн. т брутто – около 33 %.

Код группы (специализация)	Класс пути	Периодичность выполнения капитального ремонта I-ого (КРН) и III-ого (РС) уровней - млн. тонн брутто				Ремонтные схемы: виды путевых работ и очередность их выполнения за межремонтный цикл
		Железобетонные шпалы		Деревянные шпалы		
		Новые материалы	старогодные материалы	Новые материалы	старогодные материалы	
О	1, 2	1400	-	-	-	КРН-В-В-РС-В-П-КРН
О	1, 2	700	-	600	-	КРН-В-С-В-КРН

При исследовании загрязненности щебеночного балласта частицами фракций от 5 мм до 0,1 мм наблюдается практически ее равномерный рост на всем протяжении межремонтного периода [19, 20]. Структура загрязнителей при сверхнормативном пропущенном тоннаже (более 700 млн. т брутто) составляет 16 % для фракции от 25 мм до 5 мм, для фракции от 5 до 0,1 мм – 12 % и при размере частиц загрязнителей до 0,1 мм порядка 6 %.

Для 5–6-летнего периода эксплуатации для загрязнителей фракции до 0,1 мм получены зависимости величины загрязнения щебеночного балласта от толщины балластного слоя. Выявлена тенденция уменьшения доли таких частиц при увеличении толщины балласта: для слоя до 30 см она составляет 38 %, при толщине 40 см – загрязненность в среднем 32 %. При увеличении толщины на 10 см (до толщины порядка 50 см), наблюдается снижение загрязненности еще на 15 %.

На наш взгляд, современная система планирования ремонтов в течение жизненного цикла требует современной корректировки. В особенности для железнодорожных линий первого и второго классов.

Например, существующая в настоящее время система планирования промежуточных ремонтов «по фактическому состоянию» (см. табл.) имеет существенный недостаток, заключающийся в экспертном принятии решения, для которого условием эффективного планирования ремонтов пути является минимизация суммарных затрат на выполнение путевых ремонтных работ и задержек поездов с учетом количества и продолжительности требуемых «окон» (или закрытия перегона).

Такой принцип планирования негативно отражается на сроках и объемах выполнения промежуточных ремонтов. Что и отражается в результатах расследования по инциденту от 16 марта 2021 г. на Южно-Уральской железной дороге – филиале ОАО «РЖД». Следует отказаться от данной стратегии, в первую очередь, на участках первого и второго классов, с разработкой для этих классов пути периодичности таких ремонтов по наработке тоннажа или времени эксплуатации.

### **Заключение**

Для Транссибирской магистрали принято предельное значение допустимого засоре-

ния щебеночного балласта более 30 %, которое возникает при величине пропущенного тоннажа 500 млн т (около восьми лет эксплуатации). В среднем для Среднесибирского региона пропущенный тоннаж для достижения предельного засорения балласта составляет порядка 800 млн т (10 лет эксплуатации). Такие значения могут служить ориентиром для проведения ремонтов пути с использованием машин для очистки балласта, в том числе глубокой его очистки.

Наиболее пагубными в условиях интенсивной эксплуатации пути (при грузонапряженности линии 100 млн т·км брутто/км в год и более), приводящим к накоплению в пути различных неисправностей (например, углов в плане, угона рельсов, вызывающего сверхнормативный зазор, и др.), являются нарушение нормативных требований продолжительности эксплуатации и невыполнение номенклатуры промежуточных ремонтов и текущего содержания.

Установлено, что для высокой интенсивности эксплуатации пути, характерной для рассматриваемых условий, необходимо предусматривать повышенную потребность производства работ по замене упругой прокладки на скреплениях, в частности ЖБР-65ППМ, регулировку ширины колеи, а также эффективное выполнение мероприятий по текущему содержанию участков пути и изолирующих стыков.

Применяемая в настоящее время периодичность и схема выполнения ремонтов и планово-предупредительной выправки железнодорожного пути на особогрузонапряженных участках «по фактическому состоянию» не удовлетворяет перспективным техническим требованиям к конструкции железнодорожного пути и системе его технического обслуживания, обеспечивающей наработку свыше нормативной как по пропущенному тоннажу, так и по годам эксплуатации.

На основании проведенных исследований делается вывод, что стратегической задачей повышения эксплуатационной надежности пути является достижение равноресурсности в эксплуатации его элементов.

Следует отказаться от стратегии планирования промежуточных ремонтов «по фактическому состоянию» в первую очередь на участках первого и второго классов с разработкой для них периодичности ремонтов по наработке тоннажа или времени эксплуатации.

## Список литературы

1. Ицкович Г.М., Минин А.С., Винокуров А.И. Руководство к решению задач по сопротивлению материалов. М. : Высш. шк., 2001. 592 с.
2. Перельмутер, А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М. : ДМК Пресс, 2011. 736 с.
3. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. М. : Высш. шк., 2003. 560 с.
4. Горшков А.Г., Трошин В.Н., Шалашилин В.И. Сопротивление материалов. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. 544 с.
5. Гринь Е.Н., Коваленко Н.И. Факторный анализ оценки состояния пути // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 1. С. 22–23.
6. Budgeting Direct Costs of Track Complex of JSC «Russian Railways» in the Light of Modern Classification of Railway Lines. / N. Kovalenko, B. Volkov, A. Kovalenko et al. // TransSiberia 2019 : VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115. P. 177–183.
7. Об утверждении методики классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» от 23.12.2015 г. № 3048р.
8. Путевые машины / С.А. Соломонов, М.В. Попович, В.М. Бугаенко и др. М. : Желдориздат, 2000. 756 с.
9. Путевые машины для выправки железнодорожного пути, уплотнения и стабилизации балластного слоя. Технологические системы / А.В. Атаманюк, В.Б. Бредюк, В.М. Бугаенко и др. М. : УМЦ ЖДТ, 2008. 285 с.
10. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года : постановление Правительства Рос. Федерации от 22 нояб. 2008 г. № 1734-р : в ред. от 11.06.2014 № 1032-р.
11. Assessment of the Mitigation of Consequences Resulting from Incidents at the Railway. / N. Kovalenko, V. Ponomarev, N. Kovalenko et al. // TransSiberia 2019 : VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. P. 184–194.
12. Kovalenko N., Grin E., Kovalenko N. The determination of the repairs of railway track considering the reliability and risk level, E3S // Web of Conferences. 2020. Vol. 157. P. 92–99. Doi.org/10.1051/e3sconf/202015706031.
13. Бессонова Н.В. Определение общих расходов для ремонтно-путевых работ при предоставлении «окон» // Соискатель – приложение к журналу Мир транспорта. 2010. Т. 8. № 2. С. 52–54.
14. Парамонова Н.В. Оптимум для времени «окна» // Мир транспорта. 2007. Т. 5. № 1 (17). С. 114–116.
15. Гапеев Ю.В. Стабилизация пути после глубокой очистки балласта // Путь и путевое хозяйство. 1997. № 10. С. 13–16.
16. Tsvetkov V.Ya. Conceptual Model of the Innovative Projects Efficiency Estimation // European Journal of Economic Studies. 2012. Vol. (1), № 1. P. 45–50.
17. Державин А.Н., Лысенко Н.Н., Замуховский А.В. Методика назначения капитального ремонта пути на перегоне // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 5. С. 31–33.
18. Величко Д.В. Толстикова Н.А. Анализ загрязненности щебеночного балласта // Изв. Транссиба. 2016. № 3 (27). С. 110–117.
19. Абрашитов А.А. Механизм образования выплесков в балластной призме // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 3 (58). С. 210–217.
20. Оценка источников загрязнения балластного слоя из гранитного щебня и моделирование разрушения и истирания частиц щебня при динамическом нагружении / А.А. Абрашитов, А.А. Зайцев, А.В. Семак // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. (Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахуняца). М. :, 2016. С. 184–187.

## References

1. Itskovich G.M., Minin A.S., Vinokurov A.I. Rukovodstvo k resheniyu zadach po soprotivleniyu materialov [A manual to solving tasks on the resistance of materials]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2001. 592 p.
2. Perel'muter, A.V., Slivker V.I. Raschetnye modeli sooruzhenii i vozmozhnost' ikh analiza [Design models of structures and the possibility of their analysis]. Moscow: DMK Press Publ., 2011. 736 p.
3. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2003. 560 p.
4. Gorshkov A.G., Troshin V.N., Shalashilin V.I. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]. Moscow: FIZMATLIT, 2005. 544 p.
5. Grin' E.N., Kovalenko N.I. Faktorny analiz otsenki sostoyaniya puti [Factor analysis of the assessment of the state of the path]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and path facilities], 2013, no. 1, pp. 22–23.
6. Budgeting Direct Costs of Track Complex of JSC «Russian Railways» in the Light of Modern Classification of Railway Lines. / N. Kovalenko, B. Volkov, A. Kovalenko et al. // TransSiberia 2019 : VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115. Pp. 177–183.
7. Rasporiyazhenie ОАО «RZhD» от 23.12.2015 г. № 3048р «Об утверждении методики классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «RZhD» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 23, 2015 no 3048r «On approval of the methodology of classification and specialization of Railway lines of JSC «Russian Railways»].
8. Solomonov S.A., Popovich M.V., Bugaenko V.M. [et. al.]. Putevye mashiny [Path machines]. Moscow: Zheldorizdat Publ., 2000. 756 p.
9. Atamanyuk A.V., Bredyuk V.B., Bugaenko V.M. [et. al.]. Putevye mashiny dlya vypravki zheleznodorozhnogo puti, uplotneniya i stabi-lizatsii ballastnogo sloya. Tekhnologicheskie sistemy [Track machines for straightening the railway track, compaction and stabilization of the ballast layer. Technological systems]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 2008. 285 p.



10. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 22 noyabrya 2008g. № 1734-р «Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda» (v red. rasporyazheniya Pravitel'stva RF ot 11.06.2014 № 1032-р) [Resolution of the Government of the Russian Federation of November 22, 2008 No. 1734-р «Transport Strategy of the Russian Federation until 2030» (Edited by the Decree of the Government of the Russian Federation of 11.06.2014 no 1032-р)].

11. Assessment of the Mitigation of Consequences Resulting from Incidents at the Railway. / N. Kovalenko, V. Ponomarev, N. Kovalenko et al. // TransSiberia 2019 : VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Pp184–194.

12. Kovalenko N., Grin E., Kovalenko N. The determination of the repairs of railway track considering the reliability and risk level, E3S // Web of Conferences. 2020. Vol. 157. P. 92–99. Doi.org/10.1051/e3sconf/202015706031.

13. Bessonova N.V. Opredelenie obshchikh raskhodov dlya remontno-putevykh работ pri predostavlenii «okon» [Determination of total expenses for repair and track work when providing «windows»]. *Soiskatel' – prilozhenie k zhurnalu «Mir transporta»* [The applicant is an appendix to the magazine «World of Transport»], 2010, vol. 8, no. 2, pp. 52–54.

14. Paramonova N.V. Optimum dlya vremeni «okna» [Optimum for «window» time]. *Mir transporta* [World of transport], 2007, vol. 5, no. 1(17), pp. 114–116.

15. Gapeenko Yu.V. Stabilizatsiya puti posle glubokoi oчитki ballasta [Path stabilization after deep ballast cleaning]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and path facilities], 1997, no. 10, pp. 13–16.

16. Tsvetkov V.Ya. Conceptual Model of the Innovative Projects Efficiency Estimation // *European Journal of Economic Studies*. 2012, vol. 1, no. 1, pp. 45–50.

17. Derzhavin A.N., Lysenko N.N., Zamukhovskii A.V. Metodika naznacheniya kapital'nogo remonta puti na peregone [Methodology for the appointment of major repairs of the track on the stretch]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2021, no. 5, pp. 31–33.

18. Velichko D.V. Tolstikova N.A. Analiz zagryaznenosti shchebenochnogo ballasta [Analysis of contamination of crushed stone ballast]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2016, no.3(27), pp. 110–117.

19. Abrashitov A.A. Mekhanizm obrazovaniya vypleskov v ballastnoi prizme [Mechanism of formation of splashes in the ballast prism]. *Mir transporta* [World of transport], 2015, vol. 13, no. 3(58), pp. 210–217.

20. Abrashitov A.A., Zaitsev A.A., Semak A.V., Shavrin L.A. Otsenka istochnikov zagryazneniya ballastnogo sloya iz granitnogo shchebnya i modelirovanie razrusheniya i istiraniya chastits shchebnya pri dinamicheskom nagruzhenii [Assessment of sources of contamination of the ballast layer of granite rubble and modeling of destruction and abrasion of crushed stone particles under dynamic loading]. *Trudy XIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Chteniya, posvyashchennye pamyati professor G.M. Shakhunyanisa) «Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti»* [Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference (Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhunyanis) «Contemporary problems of railway track design, construction and operation»]. Moscow, 2016, pp. 184–187.

### Информация об авторах

**Коваленко Николай Иванович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пути и путевого хозяйства, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва; e-mail: kni50@mail.ru.

**Коваленко Нина Александровна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва; e-mail: nina-alex-kov@mail.ru.

### Information about the authors

**Nikolai I. Kovalenko**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Track and track facilities, Russian University of transport (MIET), Moscow; e-mail: kni50@mail.ru.

**Nina A. Kovalenko**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management of operating and safety on transport, Russian University of transport (MIET), Moscow; e-mail: nina-alex-kov@mail.ru.

## Логистические схемы доставки скоропортящихся грузов

Д.Ю. Гришкова✉, И.О. Тесленко

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

✉raigas@inbox.ru

### Резюме

В статье рассматривается значимость продовольственной безопасности нашей страны в свете последних экономических и политических событий на международной арене. Многие скоропортящиеся продукты относятся к категории продуктов первой необходимости. Для нашего государства очень значима цель их доведения до населения по доступным ценам. В цене продукции немаловажную роль играет транспортная составляющая. В зависимости от конфигурации логистических цепей поставки ее можно увеличить или сократить до минимума. В работе доказана актуальность транспортировки скоропортящихся грузов от распределительного центра до ближайших потребителей. Дана оценка прогнозного значения перевозки продовольственной продукции по Сибирскому федеральному округу. Определен оптимальный маршрут перевозки скоропортящихся грузов в Западно-Сибирском регионе, при этом за расчетный маршрут следования взято направление Новосибирск – Новокузнецк. Рассчитано кратчайшее расстояние для высокотонажных транспортных средств. Направление попадает под категорию межобластного сообщения, проходит через сеть региональных трасс, а также скоростную автомагистраль. Рассмотрены также разные варианты транспортных средств, позволяющих выполнить перевозку от двери до двери. В процессе экономических расчетов по вариантам доставки проанализирована транспортировка скоропортящихся грузов крупным продовольственным ритейлером «X5 RG», который имеет свой распределительный центр в Новосибирске. Исходя из расчетов разработаны рекомендации по использованию того или иного варианта транспортировки в зависимости от условий и расстояния перевозки. Установлено, что наиболее экономически целесообразным вариантом перевозки продуктов первой необходимости посредством автомобильного транспорта является вариант приобретения собственного транспортного средства – седельного тягача «SCANIA P380 A4X2NA», оборудованного рефрижераторным полуприцепом «Schmitz SKO 24/L». При практически равной грузоподъемности с автопоездом данное транспортное средство имеет меньший расход топлива для транспортировки и потребный расход топлива для работы холодильной установки.

### Ключевые слова

скоропортящийся груз, транспортное средство, транспортно-логистический центр, автомобильный транспорт, Западно-Сибирский регион

### Для цитирования

Гришкова Д.Ю. Логистические схемы доставки скоропортящихся грузов / Д.Ю. Гришкова, И.О. Тесленко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. № 2 (74). – С. 121–129. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).121-129.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 30.05.2022 г.; поступила после рецензирования: 2.06.2022 г.; принята к публикации: 3.06.2022 г.

## Logistics schemes for the delivery of perishable goods

D.Yu. Grishkova✉, I.O. Teslenko

Siberian Transport University, Novosibirsk, the Russian Federation

✉raigas@inbox.ru

### Abstract

The article examines the importance of food security of our country in the light of recent economic and political events in the international arena. Many perishable goods are included in the category of essential products. The goal of bringing essential products to the population at affordable prices is very important for our state. The transport component plays an important part in the price formation of products. Depending on the configuration of logistics supply chains, the transport component can be increased or reduced to a minimum. The paper proves the relevance of the transportation of perishable goods from the distribution center to the nearest consumers. The estimation of the forecast value of transportation of food products in the Siberian Federal District is given. The optimal route for the transportation of perishable goods in the West Siberian region has been determined, while the Novosibirsk - Novokuznetsk direction has been estimated route. The shortest distance for high-tonnage vehicles is calculated. The direction falls under the category of inter-regional communication, passes through a network of regional highways, as well as an expressway. Different variants of vehicles that allow door-to-door transportation are considered. When performing economic calculations on delivery options, the transportation of perishable goods by a large food retailer X5 RG, which has its own distribution center in Novosibirsk, was considered. Based on the calculations performed, recommendations have been de-

veloped for the use of a particular transportation option, depending on the conditions and distance of transportation. It was found that the most economically feasible option for transporting essential products by road was the option of purchasing their own vehicles - a truck tractor "SCANIA P380 A4X2NA" equipped with a refrigerated semi-trailer "Schmitz SKO 24/L". Its load capacity being almost equal with a road train, this vehicle has a lower fuel consumption for transportation and the required fuel consumption for the operation of the refrigeration unit.

### Keywords

perishable goods, vehicle, transport and logistics centers, road transport, costs, West Siberian region

### For citation

Grishkova D.Yu., Teslenko I.O. Logisticheskie skhemy dostavki skoroportyashchikhsya gruzov [Logistics schemes for the delivery of perishable goods]. [Modern technologies. System analysis. Modeling]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 121–129. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).121-129.

### Article Info

Received: May 30, 2022; revised: June 2, 2022; accepted: June 3, 2022.

### Введение

Наше государство уделяет большое внимание развитию продовольственного рынка страны, транспортной и складской инфраструктуры [1]. В 2019 г. Министерством транспорта Российской Федерации утверждены «Правила перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов». По всей стране реализуется большое количество инвестиционных проектов по развитию складской инфраструктуры, а также созданию распределительных центров крупных продовольственных ретейлов, например, «X5 RetailGroup», «Вкусвилл», «Магнит», «DKBR Mega Retail Group Limited», «Светофор», «Metro Cash&Carry» и др. [2].

На сегодняшний день в условиях закрытых границ из-за пандемии вопросам продовольствия уделяется особое внимание. Главной целью государства является обеспечение населения продуктами первой необходимости, к которым относятся в том числе и скоропортящиеся грузы (СПГ), по доступным ценам.

Выбор маршрута транспортировки, а также вида транспорта играет немаловажную роль в ценообразовании СПГ.

С 2018 г. стоимостной объем рынка коммерческих автомобильных перевозок в России растет в среднем на 4–7,7 % в год, что объясняется ростом внутреннего спроса. Росту объемов перевезенных грузов способствует улучшение общей экономической ситуации, растущий спрос на автотранспортные услуги со стороны крупного ритейла и развитие электронной коммерции. В 2018 г. интернет-продажи увеличились на 59 %, до 1,66 трлн руб. (наибольший прирост с 2010 г.). Также позитивное влияние оказали расширение дорожной сети и улучшение качества дорожного покрытия [3]

### Оценка вариантов конкурентоспособности перевозок скоропортящихся грузов автомобильным транспортом

Выполним оценку вариантов конкурентоспособности перевозок СПГ автомобильным транспортом в пределах Западно-Сибирского региона между городами, расположенными от Новосибирска в радиусе 500–750 км, средняя численность населения которых составляет более 350 тыс. чел.

Западно-Сибирский регион имеет площадь 2 451,1 тыс. км<sup>2</sup> (15 % территории РФ). Население региона – 17,9 млн чел., что составляет около 11 % населения России. На данной территории располагается девять субъектов РФ. Общая протяженность железнодорожных магистралей региона около 13 тыс. км. Сеть автодорог общего пользования 103 641,4 км, с твердым покрытием – 91 952,3 км [4].

Новосибирск выполняет функцию самого крупного транспортного, распределительного и транзитного узла в Сибирском федеральном округе (СФО).

Новосибирск является третьим по численности городом (примерное население – 1 620 162 чел.), а также центром Западно-Сибирского экономического района. Через Новосибирск проходит Международный транспортный коридор Транссиб, железнодорожный и автомобильные выходы в Казахстан и другие страны.

Город является крупным железнодорожным узлом, кроме Транссиба в Новосибирске сходятся железные дороги Алтайского и Кузбасского направлений. Автомобильные шоссе идут из города в шести направлениях.

Для принятия и переработки грузов, следующих в интермодальном сообщении по Рос-

сии, по международным транспортным коридорам (МТК), и обеспечения соответствующего уровня сервисного обслуживания первостепенное значение, наряду с развитием транспортных коммуникаций с соответствующим обустройством, имеет создание в крупных транспортных узлах вдоль трассы МТК мультимодальных терминальных комплексов и транспортно-логистических центров, функционирующих на основе передовых логистических технологий и обеспечивающих интеграцию товарно-материальных, информационных, сервисных и финансовых потоков [5].

Основопологающими элементами логистической инфраструктуры МТК являются мультимодальные транспортно-логистические центры (МТЛЦ), обеспечивающие скоординированное взаимодействие всех участников транспортно-логистического процесса и различных видов транспорта, рассматриваемые как стратегические точки роста экономики страны [6, 7].

Для обеспечения продовольственной безопасности и удовлетворения быстро растущих потребностей населения, в том числе в продуктах питания, в нашей стране необходимо создать 10 мультимодальных транспортно-логистических центров федерального уровня, порядка 20 МТЛЦ

регионального уровня и свыше 50 МТЛЦ территориального уровня [8, 9].

Один из таких федеральных МТЛЦ формируется на территории Новосибирска.

Агентство инвестиционного развития, Росстат в своих оценках внутреннего валового продукта за первый квартал 2020 г. отмечает рост показателей в сфере транспортировки и хранения продукции (увеличение индекса валовой добавленной стоимости на 3,1 % по сравнению с аналогичным периодом 2019 г.). Строительство складских помещений для ритейла в Новосибирске будет развиваться в ближайшие годы активными темпами. Во-первых, этот тренд характерен для рынка логистики нестоличных регионов страны: розничная торговля формирует наибольшую долю в структуре спроса на качественную складскую недвижимость. Во-вторых, Новосибирск как крупнейший транспортно-логистический узел РФ, опорная точка, где концентрируются и распределяются грузы для аудитории в 12–14 млн чел., притягивает внимание федеральных игроков [10, 11]. Схема движения грузовых потоков СПГ приведена на рис. 1.

Несмотря на снижение населения в отдельных больших и средних городах Западно-Сибирского региона, по данным статистики



**Рис. 1.** Схема движения грузовых потоков скоропортящихся грузов через Новосибирск  
**Fig. 1.** Diagram of the movement of perishable goods cargo flows through Novosibirsk

«Росстата», наблюдается рост потребительской способности СПГ, а также других видов продовольствия. Выполненные расчеты по прогнозированию грузопотоков СПГ в ближайшие назначения из Новосибирска показали, что к 2025 г. объемы возрастут по сравнению с 2021 г. примерно в 1,22 раза. Следовательно, можно отметить, что перевозки СПГ в города, находящиеся в пределах транспортной доступности к Новосибирску, будут актуальны в обозримой перспективе.

### **Определение оптимального маршрута перевозки скоропортящихся грузов**

Определим оптимальный маршрут перевозки СПГ в Западно-Сибирском регионе, при этом за расчетный маршрут следования СПГ возьмем направление Новосибирск – Новокузнецк (НКЗ).

Кратчайшее расстояние для высокотонажных транспортных средств (ТС) составляет 371 км. Направление попадает под категорию межобластного сообщения, проходит через сеть региональных трасс, а также скоростную автомагистраль [12].

Новокузнецк является наиболее многочисленным городом в Западно-Сибирском регионе среди городов с численностью населения более 500 тыс. чел. и имеет развитую сеть железных дорог, станций и подходов, торговых площадок, муниципальных распределительных

центров, продуктовых складов и др. [13].

На сегодняшний день в автомобильном транспорте существует широкая линейка ТС, позволяющая эффективно осуществлять скоростную перевозку СПГ без привязки к месту погрузки, складского хранения и конечного пункта доставки, а также доставку СПГ по формату «от двери до двери».

В экономических расчетах рассматривается схема доставки СПГ крупнейшим продовольственным ретейлом «Х5 RG», в частности сетью продуктовых и продовольственных магазинов «П».

Исследуемая компания в сентябре 2019 г. в промышленно-логистическом парке Новосибирска открыла собственный распределительный центр (рис. 2).

Новый объект позволит сохранить высокие темпы роста сети в СФО, повысить уровень локализации ассортимента в своих магазинах за счет привлечения еще большего количества местных партнеров, а местным производителям расширить географию поставок продукции за пределы СФО [14].

Мощности нового распределительного центра достаточно, чтобы обслуживать в два раза больше магазинов, чем функционирует под брендом «П» в Сибири сегодня – более 600 ед. против 1 200 [15]. Дополнительные возможности позволяют иметь серьезный потенциал для развития, а также привлекать партнерские



**Рис. 2.** Распределительный центр компании «П» в промышленно-логистическом парке  
**Fig. 2.** Distribution center of the company «P» in the industrial and logistics park

розничные сети к сотрудничеству.

Площадь центра составляет 38 500 м<sup>2</sup> и позволяет обрабатывать 5 тыс. т. груза в сут. Центр обслуживает более 135 населенных пунктов в субъектах Российской Федерации. Годовые объемы перевозки СПГ компанией «П» по Западно-Сибирскому региону приведены на рис. 3.

### Экономические расчеты

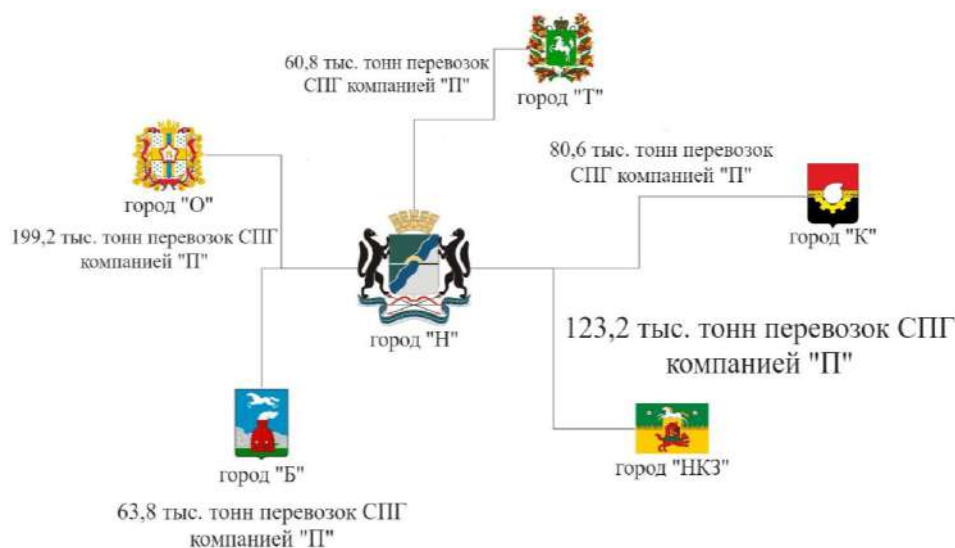
При выполнении экономических расчетов за расчетный объем перевозки принимался объем 123 тыс. т.

При определении затрат по перевозке автомобильным транспортом СПГ рассматриваются следующие блоки по трем выбранным ТС:

- пользование услугами транспортно-экспедиционной компании;
- использование собственных ТС;
- использование арендованного автотранспорта.

В табл. 1 перечислены виды ТС автомобильного транспорта для перевозки СПГ.

При расчете затрат по первому варианту перевозки за основу взят онлайн сервис компании «Деловые линии» (ДЛ) [16]. Калькулятор



**Рис. 3.** Годовой объем перевозок скоропортящихся грузов компании «П» по Западно-Сибирскому региону  
**Fig. 3.** Annual volume of perishable goods carg transportation of «P» companies in the West Siberian region

**Таблица 1.** Автомобильный транспорт, используемый при перевозке скоропортящихся грузов  
**Table 1.** Types of vehicles of motor transport used in the transportation of perishable goods cargo

Вид транспортного средства Type of vehicle		Грузоподъемность, т Load capacity, t	Объем кузова, м <sup>3</sup> Body volume, m <sup>3</sup>
Автопоезд Road train	«MAN TGS 26.350»	26,5	48
	«Schmitz Z.KO18»		48
Среднетоннажный рефрижератор Medium duty refrigerator	«ISUZU FORWARD 18.0»	8	3×34
Седелный тягач с рефрижераторным полуприцепом Truck tractor with refrigerator semitrailer	Седелный тягач (Truck tractor) «SCANIA P380 A4X2NA»	26,6	–
	Рефрижераторный полуприцеп (Refrigerator semitrailer) «Schmitz SKO 24/L»		82
Седелный тягач + платформа-контейнеровоз + 40-футовый рефрижераторный контейнер Truck tractor + Refrigerator semitrailer + 40 ft refrigerated container	Седелный тягач (Truck tractor) «SCANIA P380 A4X2NA»	27,9	–
	Платформа-контейнеровоз (refrigerator semitrailer) «Wielton NS 3 P45 R1 M2»		–
	40-футовый рефрижераторный контейнер (40 ft refrigerated container) «TCM 40HCDD»		69,81

компании ДЛ предлагает перевозку СПГ в формате «перевозка еврофурой». Сервис позволяет перевезти груз в специально выделенном автомобильном рефрижераторе грузоподъемностью 20 т и объемом кузова 80 м<sup>3</sup> для перевозки по выбранному маршруту.

В стоимость также входит услуга страхования, перевозимого СПГ, являющаяся обязательной при перевозке выбранного груза.

При расчете по второму варианту в качестве конечных затрат, связанных с использованием собственного автомобильного транспорта, определяется себестоимость одной перевозки по выбранному маршруту, умноженная на количество рейсов, необходимых для перевозки заданного объема груза из Новосибирска до Новокузнецка. Дополнительно также необходимо учесть стоимость приобретения ТС. Выберем наиболее популярный и выгодный формат приобретения ТС – лизинг [17].

В современном мире на первый план выходит скорость принятия решений, качество

оказываемых услуг, клиентоориентированность и высокий сервис. Управленческий персонал транспортно-экспедиторских, логистических терминально-складских компаний и организаций в максимально сжатые сроки разрабатывает наиболее верную стратегию: четко определяет маршрут перевозки, количество ТС, необходимых для перевозки заявленного объема груза, выбирает оптимальное ТС и т. д., при этом сохранив рентабельность перевозки и получив высокую маржинальность от каждой закрытой сделки [18].

Основные экономические затраты, влияющие на себестоимость перевозки вне зависимости от форм собственности ТС и движимого имущества: топливо для ТС и работу холодильной установки, смазочные материалы, приобретение запасных частей, оплата труда водителей ТС, расходы, связанные с оплатой в счет возмещения вреда, причиняемого автомобильным дорогам (система «Платон»).

Указанные затраты легли в основу опре-

**Таблица 2.** Сравнения размера затрат относительно имеющихся трех вариантов использования транспортных средств

**Table 2.** Comparison of the amount of costs relative to the available three options for using the vehicle

Вид транспортного средства Type of vehicle		Первый вариант First option	Второй вариант Second option	Третий вариант Third option
		Услуги транспортно-экспедиционной компании Forwarding company services	Использование собственных транспортных средств Own vehicle use	Использование арендуемых транспортных средств Rented vehicle use
Автопоезд Autotrain	«MAN TGS 26.350» «Schmitz Z.KO18»	25 522 000	57 102 857	57 898 470
Три среднетоннажных рефрижератора Three medium duty refrigerators	«ISUZU FORWARD 18.0»		132 800 534	83 332 500
Седельный тягач с рефрижераторным полуприцепом Truck trailer with refrigerator semitrailer	Седельный тягач (Truck trailer) «SCANIA P380 A4X2NA»		56 976 938	57 122 540
	Рефрижераторный полуприцеп (Refrigerator semitrailer) «Schmitz SKO 24/L»			
Седельный тягач + платформа-контейнеровоз + 40-футовый рефрижераторный контейнер Truck tractor+ refrigerator semitrailer +40 ft refrigerated container	Седельный тягач (Truck trailer) «SCANIA P380 A4X2NA»		60 542 807	61 128 471
	Платформа-контейнеровоз (Refrigerator semitrailer) «Wielton NS 3 P45 R1 M2»			
	40-футовый рефрижераторный контейнер (40 ft refrigerated container) «TCM 40HCDD»			

деления возможности транспортировки груза с наименьшими издержками для транспортной компании, а также определения размера прибыли при реализации перевозки.

Результаты экономических расчетов по трем рассматриваемым вариантам использования ТС приведены в табл. 2.

При выборе ТС важно учитывать не только грузоподъемность, но и объем кузова, рентабельность перевозки в зависимости от маршрута и расстояния, количество ТС, необходимых для перевозки заданного объема груза и другие факторы.

### Заключение

Наиболее экономически целесообразным вариантом перевозки СПГ автомобильным транспортом оказался вариант приобретения собственных ТС – седельного тягача «SCANIA P380 A4X2NA», оборудованного рефрижераторным полуприцепом «Schmitz SKO 24/L». При практически равной грузоподъемности с автопоездом данное ТС имеет меньший расход топлива для транспортировки и потребный расход топлива для работы холодильной установки.

В случае дефицита парка седельных тягачей с полуприцепами относительно целесообразно использование автопоездов «MAN TGS

26.350» с прицепом «Schmitz Z.KO18» [19, 20]. Данный вариант имеет больший объем кузова и низкие затраты на амортизационные отчисления и налоговые платежи среди крупнотоннажных ТС.

Для достижения максимальной экономической эффективности необходимо использовать современные способы приобретения собственных ТС, например, лизинг, который позволяет в течение трех лет сохранять низкую себестоимость перевозок, а также обеспечивать приобретение собственных ТС. Современные авторефрижераторы, имеющие срок службы 7–10 лет, способствуют повышению дохода при оказании транспортных услуг собственными ТС с четвертого года использования.

Использование трех среднетоннажных автомобилей-рефрижераторов грузоподъемностью 8 т каждый весьма затратно, так как собственникам ТС невыгодно сдавать их в долгосрочную аренду.

Данный вид ТС выгоден для перевозок среднетоннажного объема СПГ (междугородние перевозки, перевозки с распределительных складов до розничных сетей) в пределах региона на расстояния до 120–150 км [16].

### Список литературы

1. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации : утв. Указом Президента Рос. Федерации от 21 янв. 2020 г. № 20 // Президент России : сайт. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/45106> (Дата обращения: 19.04.2021).
2. Лавриненко П.П. Транспортная инфраструктура и экономический рост. М. : Перо, 2019. 142 с.
3. Тузов К.А., Сабельников И.Е. Грузовые перевозки в России : обзор текущей статистики // Бюл. о текущ. тенденциях рос. экономики. 2019. № 53. С. 3–5.
4. Сибирский федеральный округ // Министерство транспорта Российской Федерации : сайт. URL : [old.mintrans.ru/activity/transport\\_of\\_russian/2489/](http://old.mintrans.ru/activity/transport_of_russian/2489/) (Дата обращения 11.03.2021).
5. Прокофьева Т.А., Ювина В.Н. Создание опорной сети логистических центров на основных направлениях товародвижения в системе международных транспортных коридоров // Транспорт: наука, техника, управление. Науч. информ. сб. 2007. № 8. С. 62–65.
6. Прокофьева Т.А. Проектирование и организация региональных транспортно-логистических систем. М. : РАГС, 2009. 334 с.
7. Гришкова Д.Ю. Определение перерабатывающей способности терминала при различных условиях работы // Заметки ученого. 2021. № 1. С. 30–34.
8. Резер С.М., Прокофьева Т.А., Гончаренко С.С. Международные транспортные коридоры. Проблемы формирования и развития. М : ВИНТИ РАН, 2010. 311 с.
9. Покровская О.Д. Эволюционно-функциональный подход к развитию транспортных узлов // Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2017. С. 233–238.
10. Гришкова Д.Ю. Анализ транспортно-логистической инфраструктуры Новосибирской области // Глобальная экономика в XXI веке: роль биотехнологий и цифровых технологий : сб. науч. ст. по итогам работы второго круглого стола с междунар. участием. М., 2020. С. 170–172.
11. Степанов И. Склады на подъеме // ИД Коммерсантъ : сайт. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4012511> (Дата обращения 16.05.2021).
12. Новокузнецк // ДубльГИС : сайт. URL: [2gis.ru/novokuznetsk](http://2gis.ru/novokuznetsk) (Дата обращения: 03.05.2021).



13. Актуальные вопросы развития инфраструктуры Кузбасса рассмотрел Комитет СФ по экономической политике // Совет Федерации Федерал. Собрания Рос. Федерации : сайт. URL: <http://council.gov.ru/events/news/104771/> (Дата обращения: 11.04.2021).
14. X5 открыла логистический комплекс в Сибири // X5 Group : сайт. URL: <https://www.x5.ru/ru/Pages/Media/News/060919.aspx> (Дата обращения 16.05.2021).
15. Смольников И. «Пятерочка» запаслась ресурсами для освоения Сибири // Infopro54 : сайт. URL: <https://infopro54.ru/news/pyaterochka-zapaslas-resursami-dlya-osvoeniya-sibiri/> (Дата обращения: 20.05.2021).
16. ГК «Деловые Линии» : сайт. URL: <https://www.dellin.ru/> (Дата обращения: 25.05.2020).
17. Лизинг как финансовая услуга // All-leasing : информационный портал. (Электронный ресурс). URL: <https://www.all-leasing.ru/info/#lizing-kak-finansovaya-usluga> (Дата обращения: 21.05.2021).
18. Гришкова Д.Ю., Корнеев М.В. Развитие электронных сервисов для контейнерных перевозок // Политранспортные системы : материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2020. С. 705–709.
19. Гришкова Д.Ю. Выбор подвижного состава для автомобильной перевозки // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 11. С. 200–205.
20. Зачешигрина М.А., Тесленко И.О. Проблемы логистики перевозки скоропортящихся грузов в Российской Федерации // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2020. № 1. С. 41–47.

### References

1. Doktrina prodovol'stvennoi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii (Elektronnyi resurs) [The doctrine of food security of the Russian Federation (Electronic resource)]. Available at: <http://kremlin.ru/acts/bank/45106> (Accessed April 19, 2021).
2. Lavrinenko, P.P. Transportnaya infrastruktura i ekonomicheskii rost [Transport infrastructure and economic growth]. Moscow: Pero Publ., 2019. 142 p.
3. Tuzov K.A., Sabel'nikov I.E. Gruzovye перевозки в России: обзор текущей статистики [Cargo transportation in Russia: overview of current statistics]. *Byulleten' o tekushchikh tendentsiyakh rossiiskoi ekonomiki* [Bulletin about current trends in the Russian economy], 2019, no. 53, pp. 3 – 5.
4. Sibirskii federal'nyi okrug (Elektronnyi resurs) [Siberian Federal District (Electronic resource)]. Available at: [old.mintrans.ru/activity/transport\\_of\\_russian/2489/](http://old.mintrans.ru/activity/transport_of_russian/2489/) (Accessed March 11, 2021).
5. Prokof'eva T.A., Yuvina V.N. Sozдание opornoj seti logisticheskikh tsentrov na osnovnykh napravleniyakh tovarodvizheniya v sisteme mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Creation of a support network of logistics centers in the main directions of goods movement in the system of international transport corridors]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific Information Proceedings], 2007, no. 8, pp. 62 – 65.
6. Prokof'eva T.A. Proektirovanie i organizatsiya regional'nykh transportno-logisticheskikh sistem [Design and organization of regional transport and logistics systems: an educational and methodological complex]. Moscow: RAGS Publ., 2009. 334 p.
7. Grishkova D.Yu. Opredelenie pererabatyvayushchei sposobnosti terminala pri razlichnykh usloviyakh raboty [Determination of the processing capacity of the terminal under various operating conditions]. *Zametki uchenogo* [Notes of the scientist], 2021, no. 1, pp. 30–34.
8. Rezer S.M., Prokof'eva T.A., Goncharenko S.S. Mezhdunarodnye transportnye koridory. Problemy formirovaniya i razvitiya [International transport corridors. Problems of formation and development]. Moscow: VINITI RAN Publ., 2010. 311 p.
9. Pokrovskaya O.D. Evolyutsionno-funktsional'nyi podkhod k razvitiyu transportnykh uzlov [An evolutionary and functional approach to the development of transport hubs]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Nauchnye problemy realizatsii transportnykh proektov v Sibiri i na Dal'nem Vostoke»* [Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference «Scientific problems of implementation of transport projects in Siberia and the Far East»]. Novosibirsk, 2017, pp. 233 – 238.
10. Grishkova D.Yu. Analiz transportno-logisticheskoi infrastruktury Novosibirskoi oblasti [Analysis of the transport and logistics infrastructure of the Novosibirsk region]. *Sbornik nauchnykh statei po itogam raboty vtorogo kruglogo stola s mezhdunarodnym uchastiem «Global'naya ekonomika v XXI veke: rol' biotekhnologii i tsifrovyykh tekhnologii»* [Proceedings of scientific articles based on the results of the second round table with international participation «The Global Economy in the XXI century: the role of biotechnologies and digital technologies»]. Moscow, 2020, pp. 170 – 172.
11. Sklady na pod'eme (Elektronnyi resurs) [Warehouses on the rise (Electronic recourse)]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/4012511/> (Accessed May 16, 2021).
12. Poisk marshruta Novosibirsk – Novokuznetsk (Elektronnyi resurs) [Search for the route Novosibirsk – Novokuznetsk (Electronic resource)]. Available at: [2gis.ru/novokuznetsk/branches/70000001025142085/firm](https://2gis.ru/novokuznetsk/branches/70000001025142085/firm) (Accessed May 3, 2021).
13. Aktual'nye voprosy razvitiya infrastruktury Kuzbassa rassmotrel Komitet SF po ekonomicheskoi politike (Elektronnyi resurs) [Current issues of Kuzbass infrastructure development were considered by the SF Committee on Economic Policy (Electronic resource)]. Available at: <http://council.gov.ru/events/news/104771/> (Accessed April 11, 2021).
14. X5 otkryla logisticheskii kompleks v Sibiri (Elektronnyi resurs) [X5 has opened a logistics complex in Siberia (Electronic recourse)]. Available at: <https://www.x5.ru/ru/Pages/Media/News/060919.aspx> (Accessed May 16, 2021).
15. «Pyaterochka» zapaslas' resursami dlya osvoeniya Sibiri (Elektronnyi resurs) [«Pyaterochka» has stocked up on resources for the development of Siberia (Electronic recourse)]. Available at: <https://infopro54.ru/news/pyaterochka-zapaslas-resursami-dlya-osvoeniya-sibiri/> (Accessed May 20, 2021).
16. Kompaniya «Delovye linii» (Elektronnyi resurs) [Business Lines Company (Electronic recourse)] Available at: <https://www.dellin.ru/> (Accessed May 25, 2020).

17. Lizing kak finansovaya ushuga (Elektronnyi resurs) [Leasing as a financial service (Electronic recourse)]. Available at: <https://www.all-leasing.ru/info/#lizing-kak-finansovaya-usluga> (Accessed May 21, 2021).

18. Grishkova D.Yu., Korneev M.V. Razvitiye elektronnykh servisov dlya konteynernykh perevozok [Development of electronic services for container transportation]. *Materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii «Polytransportnye sistemy»* [Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference «Polytransport systems»]. Novosibirsk, 2020, pp. 705 – 709.

19. Grishkova D.Yu. Vybor podvizhnogo sostava dlya avtomobil'noi perevozki [The choice of rolling stock for automobile transportation]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie* [Innovations. Science. Education], 2020, no. 11, pp. 200– 205.

20. Zacheshigriva M.A., Teslenko I.O. Problemy logistiki perevozki skoroporyashchikhsya gruzov v Rossiiskoi Federatsii [Problems of logistics of transportation of perishable goods in the Russian Federation]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy transporta* [Fundamental and applied questions of transport], 2020, no. 1, pp. 41– 47.

#### Информация об авторах

**Гришкова Диана Юрьевна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры логистики, коммерческой работы и подвижного состава, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск; e-mail: raigas@inbox.ru.

**Тесленко Игорь Олегович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры логистики, коммерческой работы и подвижного состава, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск; e-mail: teslenko.io@mail.ru.

#### Information about the authors

**Diana Yu. Grishkova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Logistics, Commercial Work and Rolling Stock, Siberian Transport University, Novosibirsk; e-mail: raigas@inbox.ru.

**Igor O. Teslenko**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Logistics, Commercial Work and Rolling Stock, Siberian Transport University, Novosibirsk; e-mail: teslenko.io@mail.ru.

## Анализ влияния характеристик гидравлического гасителя колебаний на напряженно-деформированное состояние тележки пассажирского вагона

С.С. Пригожаев<sup>1</sup>✉, А.А. Пыхалов<sup>1,2</sup>, Н.О. Бурмакин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация,

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация,

<sup>3</sup>ООО «Новотэк», г. Иркутск, Российская Федерация

✉stepri@yandex.ru

### Резюме

В статье рассматривается анализ работы системы гашения колебаний вагона, связанный с перспективным направлением развития железнодорожного транспорта в направлении повышения скоростных характеристик нетягового подвижного состава железных дорог. Представлена классификация физических принципов гашения (диссипации) в используемых гасителях, выявлены их основные недостатки при условиях эксплуатации в Сибири и на Дальнем Востоке. Подробно исследуются конструктивные решения и рабочие характеристики гасителей колебаний гидравлического типа. В качестве основного расчетного случая проведен анализ реакций в точках опор гидравлических гасителей колебаний. Рассматривается гаситель типа «ЛВЗ-ЦНИИ», применяемый на тележках пассажирского вагона «КВЗ-ЦНИИ», с целью снижения уровня колебаний в механической системе: «неровности пути – колесо – подвеска тележки – тележка – подвеска кузова вагона – кузов вагона». Для решения проблемы проведен анализ возникновения неисправностей в тележках пассажирского вагона под воздействием динамических нагрузок, возникающих при его эксплуатации в условиях Восточного полигона на участке Иркутск–Улан-Удэ, характеризуемого наличием подъемов большого уклона и поворотов малого радиуса, по данным, предоставленным пассажирскими вагонными депо Иркутска и Улан-Удэ. Рассчитано напряженно-деформированное состояние рамы тележки от амплитудно-максимальной нагрузки, которая появляется в процессе эксплуатации вагона. Определены опасные сечения, возникающие в раме тележки под воздействием вертикальных нагрузок. Показано, что представленная нагрузка играет одну из ведущих ролей и, тем самым, определяется необходимость ее снижения гидрогасителем с целью увеличения ресурса работы представленной выше механической системы. Величины внешней нагрузки определялись в программном комплексе MathCAD. Анализ напряженно-деформированного состояния рамы тележки КВЗ-ЦНИИ произведено во встроенном блоке решателя Femap программного комплекса Autodesk Inventor.

### Ключевые слова

гидрогаситель, рама тележки, КВЗ-ЦНИИ, пассажирский вагон, нагрузки

### Для цитирования

Пригожаев С.С. Анализ влияния характеристик гидравлического гасителя колебаний на напряженно-деформированное состояние тележки пассажирского вагона / С.С. Пригожаев, А.А. Пыхалов, Н.О. Бурмакин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 130–141. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).130-141.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 10.06.2022 г.; поступила после рецензирования: 22.06.2022 г.; принята к публикации: 23.06.2022 г.

## Analysis of the influence of the hydraulic vibration damper characteristics on the stress-strain state of the passenger car trolley

S.S. Prigozhaev<sup>1</sup>✉, A.A. Pykhalov<sup>1,2</sup>, N.O. Burmakin<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation,

<sup>3</sup>Limited Liability Company Novotek, Irkutsk, the Russian Federation

✉stepri@yandex.ru

### Abstract

The article deals with the analysis of the operation of the carriage vibration damping system in connection with the promising direction of development of railway transport towards increasing the speed characteristics of railway non-traction rolling stock. The classification is presented of the physical principles of quenching (dissipation) in the extinguishers used. Their main disadvantages are revealed under the operating conditions of Siberia and the Far East region. The design solutions and performance characteristics of hydraulic type vibration dampers are considered in detail. As the main calculation case, the reactions at the

support points of hydraulic vibration dampers were analyzed. The «LVZ-TsNII» type extinguisher used on the trolleys of the passenger car «KVZ-TsNII» is considered in order to reduce the level of vibrations in the mechanical system: «Track irregularities – Wheel – Trolley suspension – Trolley – Wagon body suspension – Wagon body». To solve the problem, an analysis was carried out of malfunctions occurrence in the trolleys of a passenger car under the influence of dynamic loads arising during its operation under the conditions of the eastern landfill on the Irkutsk - Ulan-Ude section, characterized by the presence of large slope rises and small turning radii, according to data provided by passenger car depots of the cities of Irkutsk and Ulan-Ude. The stress-strain state of the trolley frame is calculated from the amplitude-maximum load occurring under the operating conditions of the car. Dangerous sections arising in the trolley frame under the influence of vertical loads have been determined. It is shown that the presented load plays one of the leading roles and, thereby, the need to reduce it with a hydraulic damper is determined in order to increase the service life of the mechanical system described above. The external load values were determined in the MathCAD software package. The analysis of the stress-strain state of the KVZ-TsNII trolley frame was performed in the integrated Femap solver unit of the Autodesk Inventor software package.

### Keywords

hydraulic damper, trolley frame, KVZ-TsNII, passenger wagon, loads

### For citation

Prigozhaev S.S., Pykhalov A.A., Burmakina N.O. Analiz vliyaniya kharakteristik gidravlicheskogo gasitelya kolebani na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie telezhki passazhirskogo vagona [Analysis of the influence of the characteristics of the hydraulic vibration dampener on the stress-strain state of the passenger wagon trolley]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 130–141. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).130-141.

### Article info

Received: June 10, 2022; revised: June 22, 2022; accepted: June 23, 2022.

### Введение

Высокоскоростные пассажирские перевозки являются современным перспективным направлением развития подвижного состава (ПС) железных дорог [1, 2]. В 1984 г. начата регулярная эксплуатация высокоскоростного поезда ЭР-200. В 2009 г. запущен скоростной поезд ЭВС1 «Сапсан», т. е. идет активное развитие железнодорожного транспорта [3, 4] в представленном техническом и технологическом направлениях.

Повышение скоростного режима ПС сопровождается внесением изменений в его конструкцию. Это связано в первую очередь с тем, что необходима более интенсивная проработка системы гашения колебаний, в особенности нетягового пассажирского подвижного состава, поскольку конструктивные особенности пути Восточного полигона (подъемы большого уклона и кривые малого радиуса) создают внешнее силовое воздействие периодического характера [5], которое при определенных скоростях движения вызывает резонансные явления, снижающие функциональность и безопасность ПС [6].

Таким образом, актуальным направлением в развитии скоростных возможностей ПС является разработка комплекса мероприятий и устройств снижения уровня колебаний механической системы «неровности пути – колесо – подвеска тележки – тележка – подвеска кузова

вагона – кузов вагона» на режимах повышенного скоростного движения с возможностью разработки системы управления их характеристиками в зависимости от изменения внешнего воздействия.

### Способы гашения колебаний тележек пассажирского вагона

На сегодняшний день в конструкции нетягового пассажирского подвижного состава используются различные устройства демпфирования. Учитывая, что наиболее распространенные тележки пассажирского вагона («КВЗ-ЦНИИ I и II типа», «68-4071», «68-4072» и «68-4076») имеют высокие требования к плавности движения [7], их конструктивное исполнение базируется на двух ступенях рессорного подвешивания. Эта механическая система отвечает требованиям по параметрам гибкости их упругих элементов (рессор, пружин). Чем более гибки рессоры, тем больший диапазон возмущений (толчков), возникающих при движении вагона, они компенсируют [8].

Однако, увеличение гибкости рессор не беспредельно, так как вызывает повышение амплитуд свободных колебаний кузова, тем самым, кузов вагона «долго раскачивается» на рессорном подвешивании. Для компенсации этих колебаний в конструкции нетягового ПС, наряду с ограничением гибкости подвешива-

ния, применяются особые устройства – гасители колебаний, которые создают диссипативные (рассеивающие) силы, необходимые для поглощения энергии колебаний вагона, в особенности, при входе его в режим резонанса.

Конструкции гасителей колебаний, применяемые в вагонах, разделяются по виду диссипативных сил на следующие группы:

- фрикционные, работающие за счет сухого трения (листовые рессоры, скользуны) [7, 9];
- гидравлические, работающие за счет вязкого трения, возникающего при перетекании масла через специальные калиброванные отверстия [7, 9];

- резиновые и пневмо-рессоры, создающие диссипативные силы, аналогичные силам сопротивления вязкого трения, но работающие для определенного интервала частот периодического (вибрационного) внешнего воздействия [7, 9];

К дальнейшему развитию гасителей колебаний допустимо отнести их конструкции комбинированного типа (резинофрикционные, резиногидравлические и др.), которые также создают диссипативные силы (сопротивления) вязкого и сухого трения, но дающие определенные преимущества в эксплуатации ПС.

### Недостатки существующих подходов гашения колебаний

У системы гашения колебаний пассажирского вагона имеются недостатки в виде ограничений, вызванных изменением температуры окружающей среды. Следствием этого является невозможность их использования при низких отрицательных температурах, а также полное отсутствие возможности динамического управления характеристиками гашения колебаний. В результате отмечается отсутствие адаптивности системы к внешнему воздействию.

Фрикционные гасители используются как вынужденная мера, где главный недостаток заключается в том, что изменение их характеристик невозможно без замены узлов и деталей. Также к их специфическим недостаткам стоит отнести повышенный износ элементов гасителя по причине постоянного сухого трения и необходимость их периодической замены [9, 10].

Таким образом, при возможности выбора типа устройства, создающего диссипативные силы, предпочтение отдается гидравлическим гасителям колебаний. Специфическими их недостатками для существующего нетягового по-

движного состава является использование сложного конструктивного решения, состоящего, главным образом, в установленных в нем прецизионных перепускных клапанов (рис. 1).

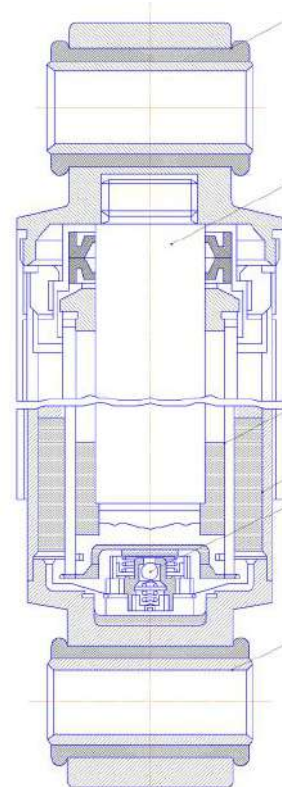


Рис. 1. Конструкция гидравлического гасителя колебаний пассажирского вагона

Fig. 1. The design of the hydraulic vibration damper of the passenger wagon

### Анализ существующей конструкции гидрогасителя

Применяемые сегодня в пассажирском ПС тележки вагонов типа КВЗ-ЦНИИ, моделей 68-4071, 68-4072, 68-4076 допускают использование их при скорости движения до 200 км/ч и имеют в своей конструкции гидравлический гаситель колебаний [11]. Предохранительный (дроссельный) клапан гидрогасителя колебаний пассажирской тележки является шариковым, отрегулированным на срабатывание при давлении  $45 \pm 0,5$  кг/см<sup>2</sup>. Гаситель заполняется маслом АМГ-10 или ВМГЗ, объем масла 0,9–1,0 л. Ход поршня 190 мм [12].

Также шариковые клапаны установлены между рабочими полостями конструкции гидрогасителя. Они открываются при создании определенного давления и позволяют маслу перетекать из полости в полость [12].

Таким образом, сопротивление внешним воздействиям строго регламентировано конструктивными особенностями гасителя колебаний и не может изменяться с течением времени под внешним воздействием.

Поскольку шариковый клапан имеет константную характеристику, можно сделать вывод, что, при применении различных по характеристикам масел, заполняющих полости гидравлического гасителя колебаний, возможно добиться изменения жесткости гасителя. Исходя из технической документации, в гидравлических гасителях используется масло АМГ-10 [13] или ВМГЗ [13].

Сравним характеристики масел (табл.).

Исходя из сравнительной характеристики масел, можно сделать вывод, что применяемые сегодня рабочие тела практически не отличаются друг от друга, что, в свою очередь, говорит о том, что характеристики гасителей практически одинаковы.

Анализ конструкции и характеристик рабочих тел гидравлических гасителей колебаний пассажирского подвижного состава железных дорог и автомобильных телескопических амортизаторов позволяет сделать вывод, что расчеты таких амортизаторов будут идентичны.

Расчет гидравлического гасителя колебаний сводится к предположению ламинарного режима истечения жидкости через дроссельные отверстия [14].

Однако при расчетах и построении математической модели гасителя необходимо учитывать режим его работы и конструктивные особенности:

– наклонное рабочее положение гасителя колебаний [15];

– наличие клапанов максимального давления жидкости [16];

Вышеописанные особенности приводят к нелинейным зависимостям силы от скорости штока.

### Расчет реакций гидравлического гасителя

Для дальнейших расчетов гидравлических амортизаторов определим математическую модель реакции гасителей центрального подвешивания. Для этого построим кинематические схемы перемещений (рис. 2) и относительных скоростей (рис. 3) [16].

Из рисунков выведем относительные перемещения рамы и надпрессорной балки:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{\Gamma Z_i} &= U_{pzi} - U_{Hz_i} \\ \Delta_{\Gamma y_i} &= U_{pyi} - U_{Hy_i} \end{aligned} \right\},$$

где  $U_{pzi}$  – вертикальные перемещения верхней точки крепления гасителя колебаний;  $U_{Hz_i}$  – вертикальные перемещения нижней точки крепления гасителя колебаний;  $U_{pyi}$  – горизонтальные перемещения верхней точки крепления гасителя колебаний;  $U_{Hy_i}$  – горизонтальные перемещения нижней точки крепления гасителя колебаний.

Выразим вертикальные перемещения через координаты кузова и тележек:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{\Gamma Z1} &= z - z_{T_1} + \varphi \cdot L_1 + \theta \cdot D_{\Gamma_1} - \theta_{T_1} \cdot d_{\Gamma_1}; \\ \Delta_{\Gamma Z2} &= z - z_{T_1} + \varphi \cdot L_1 + \theta \cdot D_{\Gamma_2} - \theta_{T_1} \cdot d_{\Gamma_2}; \\ \Delta_{\Gamma Z3} &= z - z_{T_2} + \varphi \cdot L_2 + \theta \cdot D_{\Gamma_3} - \theta_{T_2} \cdot d_{\Gamma_3}; \\ \Delta_{\Gamma Z4} &= z - z_{T_2} + \varphi \cdot L_2 + \theta \cdot D_{\Gamma_4} - \theta_{T_2} \cdot d_{\Gamma_4}. \end{aligned} \right\}$$

Аналогично выразим для горизонтальных перемещений:

Характеристики жидкости, используемой в качестве рабочего тела гидравлических гасителей  
Hydraulic damper working fluid characteristics

Критерий. Criterion	Масло АМГ-10	Масло ВМГЗ
Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с (сСт) при температуре +50°C, не менее Kinematic viscosity, mm <sup>2</sup> /c (cCt) under +50°, at least	10	10
Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с (сСт) при температуре -50°C, не более Kinematic viscosity, mm <sup>2</sup> /c (cCt) under -50°, no more than	1 250	1 500
Температура застывания, °C, не выше Pour point, °C, no more than	-70	-60
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °C, не ниже Flash point determined in open crucible, °C, at least	93	135
Нормирование. Rationing	ГОСТ 6794-2017	ТУ 38.101479-86

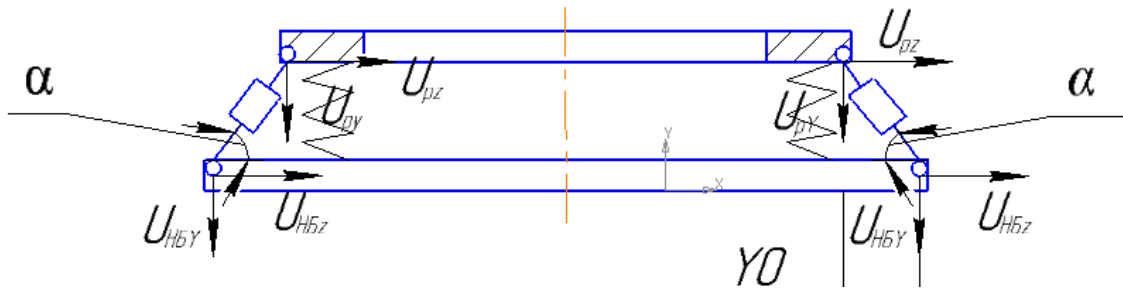


Рис. 2. Кинематическая схема перемещений  
Fig. 2. Kinematic scheme of shifts

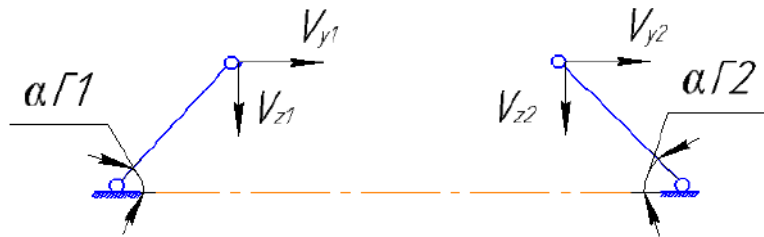


Рис. 3. Кинематическая схема относительных скоростей  
Fig. 3. Kinematic scheme of relative velocities

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{\Gamma y1} &= y - y_{T1} + \psi \cdot L_1 + \theta \cdot H_1 - \theta_{T1} \cdot h_{p1}; \\ \Delta_{\Gamma y2} &= y - y_{T1} + \psi \cdot L_1 + \theta \cdot H_1 - \theta_{T1} \cdot h_{p1}; \\ \Delta_{\Gamma y3} &= y - y_{T2} + \psi \cdot L_2 + \theta \cdot H_2 - \theta_{T2} \cdot h_{p2}; \\ \Delta_{\Gamma y4} &= y - y_{T2} + \psi \cdot L_2 + \theta \cdot H_2 - \theta_{T2} \cdot h_{p2}. \end{aligned} \right\}$$

Тогда скорости относительных перемещений рам и надрессорных балок будут:

$$\left. \begin{aligned} v_{zi} &= \frac{d}{dt} \Delta_{\Gamma zi}; \\ v_{yi} &= \frac{d}{dt} \Delta_{\Gamma yi}. \end{aligned} \right\}$$

Следовательно, скорости деформаций гасителей колебаний будут представлены формулами:

$$\left. \begin{aligned} v_{\Gamma 1} &= v_{y1} \cdot \cos \alpha_1 \cdot \text{sign } \alpha_1 + v_{z1} \cdot \cos \alpha_1 \cdot \text{sign } \alpha_1; \\ v_{\Gamma 2} &= v_{y2} \cdot \cos \alpha_2 \cdot \text{sign } \alpha_2 + v_{z2} \cdot \cos \alpha_2 \cdot \text{sign } \alpha_2; \\ v_{\Gamma 3} &= v_{y3} \cdot \cos \alpha_3 \cdot \text{sign } \alpha_3 + v_{z3} \cdot \cos \alpha_3 \cdot \text{sign } \alpha_3; \\ v_{\Gamma 4} &= v_{y4} \cdot \cos \alpha_4 \cdot \text{sign } \alpha_4 + v_{z4} \cdot \cos \alpha_4 \cdot \text{sign } \alpha_4. \end{aligned} \right\}$$

Поскольку углы наклона гасителей колебаний будут изменяться, их можно найти по формуле:

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta_{\Gamma zi}}{y_0 + \Delta_{\Gamma yi}} \right),$$

где  $y_0$  – конструктивный размер.

Определим усилия на штоках:

$$\begin{aligned} P_{\Gamma i} &= \beta_{\Gamma i} \cdot v_{\Gamma i}, \text{ если } P_{\Gamma i} \leq P_{\Gamma \max}, \\ P_{\Gamma i} &= P_{\Gamma \max}, \text{ если } P_{\Gamma i} > P_{\Gamma \max}, \end{aligned}$$

где  $\beta_{\Gamma i}$  – коэффициент сопротивления жидкости в гасителе;  $P_{\Gamma \max}$  – максимальное усилие, определяемое предохранительным клапаном.

Тогда проекции усилий на гасителях равны:

$$\left. \begin{aligned} P_{\Gamma zi} &= |P_{\Gamma i}| \cdot \sin \alpha_i \cdot \text{sign } v_{\Gamma zi}; \\ P_{\Gamma yi} &= |P_{\Gamma i}| \cdot \cos \alpha_i \cdot \text{sign } v_{\Gamma yi}; \end{aligned} \right\} \text{ при } P_{\Gamma i} \leq P_{\Gamma \max}.$$

$$\left. \begin{aligned} P_{\Gamma zi} &= P_{\Gamma \max} \cdot \sin \alpha_i \cdot \text{sign } v_{\Gamma zi}; \\ P_{\Gamma yi} &= P_{\Gamma \max} \cdot \cos \alpha_i \cdot \text{sign } v_{\Gamma yi}; \end{aligned} \right\} \text{ при } P_{\Gamma i} > P_{\Gamma \max}.$$

Если применить раздельное гашение, то:

$$\left. \begin{aligned} P_{\Gamma zi} &= \beta_{\Gamma zi} \cdot v_{\Gamma zi}; \\ P_{\Gamma yi} &= \beta_{\Gamma yi} \cdot v_{\Gamma yi}; \end{aligned} \right\}$$

где  $\beta_{\Gamma zi}$ ,  $\beta_{\Gamma yi}$  – коэффициенты сопротивления жидкости в гасителях раздельного действия.

Анализ существующей конструкции гидравлического гасителя, его особенностей, характеристик и эксплуатационных данных показывают все ранее перечисленные недостатки. Сотрудники пассажирского вагонного депо «Иркутск» Восточно-Сибирского филиала АО «Федеральная пассажирская компания» сообщают, что при эксплуатации тележек КВЗ-ЦНИИ (наиболее часто встречающихся в пассажирском подвижном составе, по сравнению с другими моделями тележек) часто возникают

трещины на раме тележки и разрывы. Основной причиной этих неисправностей считают неправильную работу гидравлических гасителей колебаний при отрицательных температурах. Масло, находящееся в гидравлическом гасителе, загустевает и гаситель работает как жесткая тяга, не поглощая колебания, а усиливая их воздействие.

Для формирования гипотезы причин массового появления трещин на рамах тележек, проведем построение и рассчитаем методом конечных элементов (МКЭ) прочность рамы тележки КВЗ ЦНИИ I типа. Данный расчет позволит увидеть опасные сечения рамы.

### Построение расчетной схемы рамы тележки

Проанализировав конструкцию тележки пассажирского вагона в целом, можно представить расчетную схему (рис. 4) с отображением вертикальных нагрузок  $P$ .

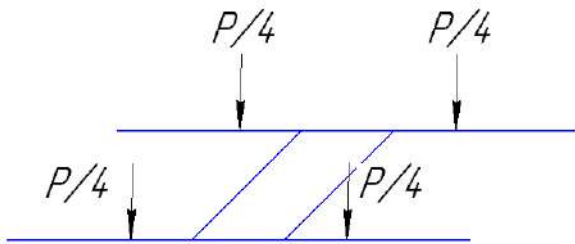


Рис. 4. Расчетная схема статической нагрузки тележки КВЗ-ЦНИИ I типа

Fig. 4. Design scheme of the static load of the KVZ-TsNII type I trolley

### Аналитический расчет сил, оказывающих воздействие на раму тележки

Продольная сила инерции тележки возникает от приложенной к ударно-тяговым приборам продольной нормированной силы. Сила инерции прикладывается в центре тяжести [17] соответствующей массы:

$$N_{и} = N \cdot \frac{m_{т}}{m_{бр}}$$

где  $N$  – максимальное продольное нормированное усилие в зависимости от расчетного режима: для 1-го режима (удар) –  $N = 2,5$  МН; для 3-го режима (сжатие или растяжение) –  $N = 1,0$  МН;  $m_{т}$  – масса тележки, кг;  $m_{бр}$  – масса вагона брутто, кг.

Согласно измерениям и технической документации,  $2b = 1\,495$  мм

За силу тяжести брутто принимаем сумму сил тяжести груза (пассажиров) и силы тяжести элементов нетягового ПС, нагружающих рассчитываемый элемент, включая вес самого элемента [18].

Статическая нагрузка, приходящаяся на раму тележки ( $H$ ), находится по формуле:

$$P_{ст} = \frac{P_{бр} - n_{т} \cdot (n_0 (m_{кп} + 2m_{бу} + 4m_{рк}^6) + m_{р}) \cdot g}{n_{т} \cdot n_{р}},$$

где  $n_{т}$  – количество тележек в вагоне (две);  $n_0$  – количество осей в тележке (две);  $m_{кп}$  – масса колесной пары (1 210 кг);  $m_{бу}$  – масса буксового узла в сборе (117 кг);  $m_{рк}^6$  – масса одного комплекта упругих элементов буксового подвешивания (31 кг);  $m_{р}$  – масса рамы пассажирской тележки (1 250 кг);  $n_{р}$  – число одноименных параллельно нагруженных элементов в одной тележке (рам в тележке) (одна);  $g$  – ускорение свободного падения (9,81 м/с<sup>2</sup>).

Вес вагона брутто определим по формуле:

$$P_{бр} = (m_{ТВ} + n_{пас} \cdot m_{пас} + m_{бар}) \cdot g,$$

где  $m_{ТВ}$  – тара вагона (58 000 кг);  $n_{пас}$  – расчетное количество пассажиров вагона, чел.;  $m_{пас}$  – средняя масса одного пассажира с багажом (100 кг);  $m_{бар}$  – масса полезной нагрузки багажного и почтово-багажного вагонов (для пассажирского вагона не используется), кг.

Динамическую нагрузку  $P_{д}$ , действующую на раму тележки ( $H$ ), рассчитаем по формуле:

$$P_{д} = P_{ст} \cdot k_{вд},$$

где  $k_{вд}$  – коэффициент вертикальной динамики, находится по формуле:

$$k_{вд} = \bar{k}_{вд} \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi} \ln \frac{1}{1 - p(k_{вд})}},$$

где  $\beta$  – параметр распределения, для пассажирских вагонов,  $\beta = 1 - p(k_{вд})$  – вероятностное распределение случайной функции коэффициента вертикальной динамики, при оценке прочности по допускаемым напряжениям по расчетным режимам (0,97);  $\bar{k}_{вд}$  – среднее вероятностное значение коэффициента вертикальной динамики, рассчитаем по формуле:

$$\bar{k}_{вд} = a + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot b \cdot \frac{V - 15}{f_{ст}},$$

где  $a$  – коэффициент, учитывающий обрессоренность рассматриваемого элемента (для обрессоренных частей тележки – 0,1);  $V$  – конструктивная скорость (для пассажирского ваго-



на – 45 м/с);  $f_{ст}$  – суммарный статический прогиб под массой брутто вагона (для тележки КВЗ-ЦНИИ тип I – 0,2 м);  $b$  – коэффициент, учитывающий влияние числа осей рассчитаем по формуле:

$$b = \frac{n_0 + 2}{2 \cdot n_0},$$

где  $n_0$  – число осей в тележке.

Вертикальная добавочная нагрузка от продольной силы инерции кузова, действующая на тележку (Н) [17, 18], рассчитывается по формуле:

$$P_{ик} = N_{ик} \cdot \frac{h_a}{2l},$$

где  $h_a$  – расстояние от центра тяжести кузова до оси автосцепки (1,135 м);  $2l$  – база вагона (для расчетного типа пассажирского вагона – 17 м);  $N_{ик}$  – продольная сила инерции кузова брутто, Н, найдем по формуле:

$$N_{ик} = N \cdot \frac{m_{куз}}{m_{бр}},$$

где  $N$  – максимальное продольное нормированное усилие в зависимости от расчетного режима: для 1-го режима (удар) –  $N = 2,5$  МН; для 3-го режима (сжатие или растяжение) –  $N = 1,0$  МН;  $m_{куз}$  – масса кузова вагона брутто (кг), находится по формуле:

$$m_{куз} = m_{бр} - m_T \cdot n_T,$$

$m_{бр}$  – масса брутто вагона, рассчитывается по формуле:

$$m_{бр} = \frac{p_0 \cdot n_{ов}}{g},$$

где  $p_0$  – осевая нагрузка (кН);  $n_{ов}$  – количество осей в вагоне (осность);  $n_T$  – количество тележек в вагоне;  $m_T$  – масса тележки (для КВЗ-ЦНИИ тип I – 7 000 кг).

### Боковая непогашенная центробежная сила

Боковая сила равна разности центробежной силы и горизонтальной составляющей силы тяжести, возникающей из-за возвышения наружного рельса в кривой. Равнодействующая сила считается приложенной в центре соответствующей массы [17, 18].

Боковая центробежная сила, непогашенная возвышением наружного рельса в кривой, передаваемая на тележку (Н), рассчитывается по формуле:

$$H_{цн} = \frac{P_{бр} \cdot \eta_n}{n_T \cdot n_p},$$

где  $P_{бр}$  – вес брутто вагона (кН);  $n_T$  – количество тележек в вагоне;  $n_p$  – количество параллельно нагруженных деталей в тележке (рама тележки);  $\eta_n$  – коэффициент, учитывающий долю боковой центробежной силы, непогашенной возвышением наружного рельса в кривой от веса брутто вагона, рассчитывается по формуле:

$$\eta_n = \frac{V^2}{g \cdot R} - \frac{h}{2S},$$

где  $V$  – скорость движения (максимальная), м/с;  $R$  – радиус кривизны кривой, м;  $h$  – возвышение наружного рельса над внутренним, м;  $2S$  – расстояние между кругами катания колесной пары, м.

Для пассажирских вагонов (для предварительных расчетов)  $\eta_n = 0,1$  (10 %).

### Поперечная составляющая продольной квазистатической силы

Поперечные силы возникают от взаимодействия между вагонами в кривых участках пути при движении поезда с малой скоростью движения и при маневровой работе [17, 18]. Поперечная составляющая продольной квазистатической силы (удара), передаваемая на раму тележки (Н), находится по формуле:

$$H_N = N \cdot \left( \frac{\delta \cdot L}{l^2} \cdot \left( 1 + \frac{L}{a} \right) + \frac{L_{об}}{R} \right) \cdot \frac{l}{R},$$

где  $N$  – продольное максимальное нормируемое усилие (удар), МН;  $\delta$  – возможное боковое перемещение шкворневого сечения кузова вагона за счет зазоров в буксовых направляющих, пятниках и упругих деформаций рессор (для пассажирских вагонов – 0,045 м);  $a$  – расчетная длина корпуса автосцепки (для СА-3 – 1,0 м);  $2l$  – база вагона (для пассажирских вагонов типовой конструкции 17 м);  $2L_{об}$  – длина вагона по осям сцепления (для пассажирских вагонов типовой конструкции – 24,537 м);  $R$  – радиус кривой (250 м);  $2L$  – расстояние между упорными плитами автосцепок, м, рассчитываемая по формуле:

$$2L = 2L_{об} - 2a.$$

### Самоуравновешенная вертикальная кососимметричная сила

Вертикальные кососимметричные силы возникают вследствие различного уровня положения опорных точек пути под колесами экипажа, различных высот буксовых рессор, отклонений от плоскостности опорных поверхностей рам тележек и других неточностей [18]. Учитывается в конструкциях с жесткой рамой. Кососимметричная сила, приложенная к одной буксе (Н), рассчитывается по формуле:

$$P_k = \frac{z}{4} \cdot \frac{2b}{2S} \cdot \frac{C_6 \cdot C_p}{C_6 + C_p},$$

где  $z$  – вертикальное эквивалентное смещение одного колеса тележки, соответствующее вертикальному отводу одной рельсовой нитки, равному 6,7 % (для тележки с базой 2,4 м  $z = 0,016$ );  $C_6$  – жесткость буксового рессорного подвешивания (над одной буксой), Н/м;  $C_p$  – жесткость рамы тележки при кососимметричной нагрузке (на 1/4 рамы), Н/м;  $2b$  – расстояние между центрами буксовых опор рамы, м;  $2S$  – расстояние между кругами катания колес одной колесной пары, м.

#### Суммарные нагрузки по расчетным режимам

В соответствии с расчетным режимом определяется суммарная нагрузка  $P$ ,  $N$  и  $H$ , действующая на раму тележки.

Суммарная нагрузка по 1-му режиму

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P_{ст} + 0,5 \cdot P_{икл}; \\ H_1 &= H_{N_1}; \\ N_1 &= N_{И_1}. \end{aligned} \right\}$$

Суммарная нагрузка по 3-му режиму

$$\left. \begin{aligned} P_3 &= P_{ст} + P_d + P_k; \\ H_3 &= H_{и}; \\ N_3 &= N_{И_3}. \end{aligned} \right\}$$

#### Характеристики пружин буксового подвешивания

Жесткость пружины (Н/м) определяется по формуле:

$$C = \frac{P_{пр}}{f_{пр}} = \frac{P_{раб}}{f_{раб}},$$

где  $P_{пр}$  – предельное усилие сжатия пружины, Н;  $P_{раб}$  – усилие рабочей деформации пружины, Н;  $f_{пр}$  – предельный прогиб пружины, м;  $f_{раб}$  – рабочий прогиб пружины, м.

Характеристики внутренней пружины [19]: жесткость пружины – 86 700 Н/м; число рабочих витков – 3,9; число витков полное – 5,4; направление навивки пружины – правое; длина развернутой пружины – 2 102 мм.

Характеристики наружной пружины: жесткость пружины – 560 580 Н/м; число рабочих витков – 3,9; число витков полное – 5,4; направление навивки пружины – правое; длина развернутой пружины – 3 325 мм.

#### Суммарная жесткость комплекта пружин буксового подвешивания

При параллельной работе упругих элементов общая жесткость определяется по формуле:

$$C_{общ} = \sum C_i.$$

#### Расчет сил, оказывающих воздействие на раму тележки

Произведем расчет для 1-го режима (удар).

Масса брутто вагона:

$$m_{бр} = \frac{185 \cdot 4}{9,81} = 75,43 \text{ т.}$$

Масса кузова вагона брутто:

$$m_{куз} = 75 430 - 7 000 \cdot 2 = 61 430 \text{ кг.}$$

Продольная сила инерции тележки:

$$N_{И_1} = 2,5 \cdot \frac{7000}{61430} = 0,285 \text{ МН.}$$

Вес вагона брутто:

$$P_{бр} = (58 000 + 36 \cdot 100) \cdot 9,81 = 604,296 \text{ кН.}$$

Статическая нагрузка, приходящаяся на раму тележки:

$$P_{ст} = \frac{\left[ -2 \cdot (2 \cdot (1210 \cdot 2 \cdot 117 + 4 \cdot 31) + 1210) \cdot 9,81 \right]}{2 \cdot 1} = 259121,5 \text{ Н.}$$

Динамическая нагрузка

$$P_d = 259,121 \cdot 0,325 = 84,214 \text{ кН.}$$

Коэффициент вертикальной динамики:

$$k_{вд} = 0,154 \cdot \frac{1}{1} \cdot \sqrt{\frac{4}{3,14} \ln \frac{1}{1-0,97}} = 0,325,$$

где среднее вероятное значение коэффициента вертикальной динамики:

$$\bar{k}_{вд} = 0,1 + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot \frac{45 - 15}{0,2} = 0,154.$$

Коэффициент, учитывающий влияние числа осей:

$$b = \frac{2+2}{2 \cdot 2} = 1.$$

Вертикальная добавочная нагрузка от продольной силы инерции кузова, действующая на тележку:

$$P_{\text{нк}} = 2,036 \cdot \frac{1,135}{17} = 0,136 \text{ МН.}$$

Продольная сила инерции кузова брутто:

$$N_{\text{нк}} = 2,5 \cdot \frac{61430}{75430} = 2,036 \text{ МН.}$$

Боковая центробежная сила, непогашенная возвышением наружного рельса в кривой, передаваемая на тележку:

$$H_{\text{цн}} = \frac{604,296 \cdot 0,1}{2 \cdot 1} = 30,215 \text{ кН.}$$

Поперечная составляющая продольной квазистатической силы (удара), передаваемая на раму тележки:

$$H_N = 2,5 \cdot \left( \frac{0,045 \cdot 11,269}{8,5^2} \cdot \left( 1 + \frac{11,269}{1} \right) + \frac{12269}{250} \right) \cdot \frac{8,5}{250} = 0,0115 \text{ МН.}$$

Расстояние между упорными плитами автосцепок:

$$2L = 24,537 - 2 \cdot 1.$$

Кососимметричная сила, приложенная к одной буксе:

$$P_{\text{к}} = \frac{0,016}{4} \cdot \frac{0,58}{1,57} \cdot \frac{C_6 \cdot C_p}{C_6 + C_p}.$$

Суммарная нагрузка по 1-му режиму

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= 259121,5 + 0,5 \cdot 136000 = \\ &= 327121,5 \text{ Н;} \\ H_1 &= 11500 \text{ Н;} \\ N_1 &= 285000 \text{ Н.} \end{aligned} \right\}$$

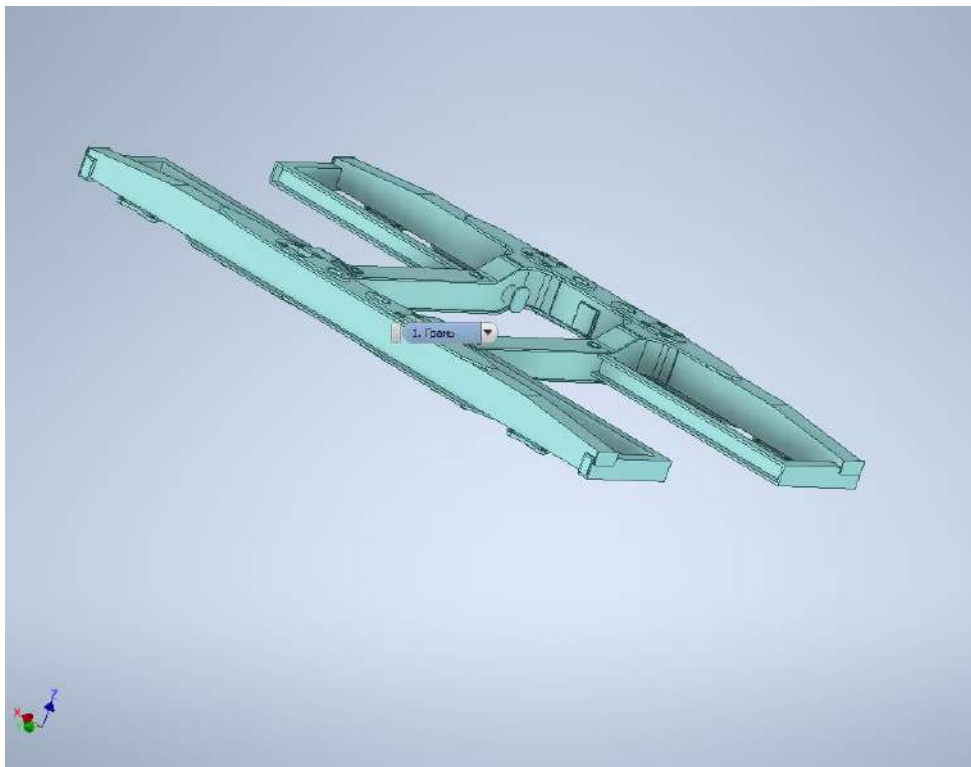
Общая жесткость пружин

$$C_{\text{общ}} = 560\,580 + 86\,700 = 647\,280 \text{ Н/м.}$$

По расчетным значениям проведем анализ прочности рамы тележки пассажирского вагона (рис. 6) МКЭ [20] с использованием встроенного решателя анализа напряжений [21] программного комплекса Autodesk Inventor.

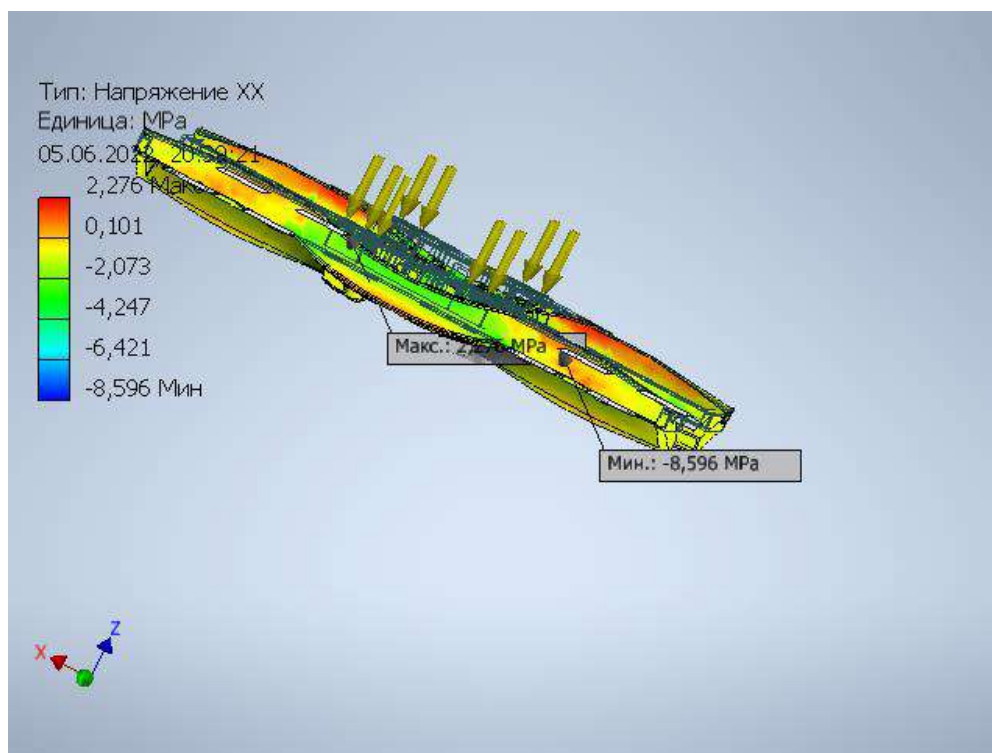
Характер возникающих повреждений при эксплуатации пассажирских вагонов дает право сказать, что основной причиной возникновения трещин является вертикальная нагрузка.

При моделировании рассмотрим вертикальную нагрузку на раму тележки. Согласно конструкции тележки КВЗ-ЦНИИ, вертикальная нагрузка равномерно распределяется между



**Рис. 6.** Модель рамы тележки, подлежащая анализу напряжений методом конечных элементов

**Fig. 6.** Model of the trolley frame, subject to stress analysis by the finite element method



**Рис. 7.** Анализ напряжений в раме тележки KB3-ЦНИИ I типа  
**Fig.7.** Stress analysis in the frame of the KVZ-TsNII type I trolley

элементами люлечного подвешивания, которые, в свою очередь, опираются на раму в четырех характерных точках. Анализ модели в программном комплексе показывает опасные сечения рамы (рис. 7).

### Заключение

Исходя из аналитического и численного решения МКЭ определения напряженно-деформированного состояния можно сделать вывод, что динамическая нагрузка на раму при расчетных условиях находится в допустимых пределах.

Однако при осмотре неисправностей, возникающих при эксплуатации, выявляются тре-

щины и разрывы рамы тележки пассажирского вагона не только в опасных сечениях, но и в местах наименьших напряжений. Это может быть объяснено тем, что, при работе тележки в особых условиях эксплуатации появляются дополнительные динамические (диссипативные) силы. Зоны появления трещин и разрывов на раме тележки показывают, что, скорее всего, их причиной является неправильная эксплуатация и неисправность гидравлических гасителей колебаний. Для подтверждения теории стоит отдельно рассмотреть гидравлический гаситель и его крепление к раме тележки.

### Список литературы

1. Киселёв И.П., Сотников Е.А., Суходоев В.С. Высокоскоростные железные дороги. СПб. : ПГУПС, 2001. 59 с.
2. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс. / И.П. Киселёв, Л.С. Блажко, М.Я. Брынь и др. Т. 1. М. : УМЦ ЖДТ, 2018. 428 с.
3. Крейнис З.Л. Очерки истории железных дорог. Кн. 2 : Как поезда самолеты догоняли. М. : УМЦ ЖДТ, 2009. 279 с.
4. Устройство и эксплуатация высокоскоростного наземного транспорта : учеб. пособие / Д. В. Пегов и др. М. : УМЦ ЖДТ, 2014. 266 с.
5. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона : учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1991. 360 с.
6. Вагоны. Основы конструирования и экспертизы технических решений : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / А. П. Азовский и др. М. : Маршрут, 2005. 489 с.
7. ГОСТ Р 55821-2013. Тележки пассажирских вагонов локомотивной тяги. Технические условия. Введ. 2014-07-01. М. : Стандартинформ, 2014. 16 с.

8. Гасители колебаний вагонов / И. И. Челноков и др. М. : Трансжелдориздат, 1963. 176 с.
9. Грачева Л.О. Спектральный анализ вынужденных колебаний вагона при случайных неровностях железнодорожного пути и выбор параметров рессорного подвешивания // Тр. ЦНИИ МПС. 1967. Вып. 347. С. 151–168.
10. Ромен Ю.С. О нелинейных колебаниях железнодорожного экипажа в кривых произвольного очертания // Тр. ЦНИИ МПС. 1967. Вып. 347. С. 5–26.
11. Егоров В.П. Устройство и эксплуатация пассажирских вагонов (для проводников). М. : УМЦ МПС России, 2004. 335 с.
12. ГОСТ 33749-2016. Демпферы гидравлические железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. Введ. 2016–04–29. М. : Стандартинформ, 2019. 11 с.
13. Быков Б.В. Конструкция тележек грузовых и пассажирских вагонов : учеб. пособие : альбом. М. : Маршрут, 2004. 36 с.
14. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. М. : Альянс, 2010. 423 с.
15. Пастухов И.Ф., Пигунов В.В., Кошкалда Р.О. Конструкция вагонов: учебник. 2-е изд. М. : Маршрут, 2004. 503 с.
16. Динамика пассажирского вагона и пути модернизации тележки КВЗ-ЦНИИ / В.В. Хусидов, А.А. Хохлов, Г.И. Петров и др. М. : МИИТ, 2001. 160 с.
17. Конструирование и расчет вагонов : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В.В. Лукин, П.С. Анисимов, В.Н. Котуранов и др. М. : УМЦ ЖДТ, 2011. 688 с.
18. Конструирование и расчет вагонов : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Лукин и др. М. : УМК МПС России, 2000. 727 с.
19. ГОСТ 1452-2011. Пружины цилиндрические винтовые тележек и ударно-тяговых приборов подвижного состава железных дорог. Технические условия. Введ. 2011–07–15. М. : Стандартинформ, 2011. 22 с.
20. Пастухов И.Ф., Пигунов В.В. Расчет вагонных конструкций методом конечных элементов : учеб. пособие. Гомель: БелИ-ИЖТ, 1991. 126 с.
21. Трэмблей Т. Autodesk Inventor 2013 и Autodesk Inventor LT 2013. Основы. Официальный учебный курс. М. : ДМК Пресс, 2013. 343 с.

### References

1. Kiselev I.P., Sotnikov E.A., Sukhodoev V.S. Vysokoskorostnye zheleznye dorogi [High-speed railways]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2001. 60 p.
2. Kiselev I.P., Blazhko L.S., Bryn' M.Ya. [et al.]. Vysokoskorostnoi zheleznodorozhnyi transport. Obshchii kurs (v 2 t). T. 1 [High-speed rail transport. General course (in 2 volumes). Vol. 1]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 2018. 428 p.
3. Kreinis Z.L. Ocherki istorii zheleznykh dorog. Dva stoletiya (V 3 t). T. 2: Kak poezda samolety dogonyali [Essays on the history of railways. Two centuries (In 3 volumes). Vol. 2: How trains caught up with planes]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 2009. 280 p.
4. Pegov D.V., Evstaf'ev A.M., Maznev A.S., Vasil'ev A.V., Sychugov A.N. Ustroistvo i ekspluatatsiya vysokoskorostnogo nazemnogo transporta [Construction and operation of high-speed ground transport]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 2014. 267 p.
5. Vershinskii S.V., Danilov V.N., Khusidov V.D. Dinamika vagona [Dynamics of the wagon]. Moscow: Transport Publ., 1991. 360 p.
6. Azovskii A.P., Aleksandrov E.V., Kobishanov V.V. [et al.] Vagony. Osnovy proektirovaniya i ekspertizy tekhnicheskikh reshenii [Wagons. Fundamentals of design and expertise of technical solutions]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 490 p.
7. GOST R 55821-2013. Telezhki passazhirskikh vagonov lokomotivnoi tyagi. Tehnicheskie usloviya (Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii) [State standard R 55821-2013 «Bogies of passenger cars on locomotive traction. Specifications» (National Standard of the Russian Federation)]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 16 p.
8. Chelnokov I.I., Vishnyakov B.I., Garbuzov V.M., Estling A.A. Gasiteli kolebanii vagonov [Vibration dampers of wagons]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1963. 176 p.
9. Gracheva L.O. Spektral'nyi analiz vynuzhdennykh kolebanii vagona pri sluchainykh nerovnostyakh zheleznodorozhnogo puti i vybor parametrov resornogo podveshivaniya [Spectral analysis of forced vibrations of the car with random irregularities of the railway track and selection of spring suspension parameters]. *Trudy VNIIZhT* [Proceedings of the All-Union Scientific Research Institute of Railway Transport], 1967, no. 347, pp. 151–168.
10. Romen Yu.S. O nelineinykh kolebaniyakh zheleznodorozhnogo ekipazha v krivykh proizvol'nogo ochertaniya. [On non-linear oscillations of a railway carriage in curves of arbitrary shape]. *Trudy TSNII MPS* [Proceedings of the Central Research Institute of the Ministry of Railways], 1967, no. 347, pp. 18–31.
11. Egorov V.P. Ustroistvo i ekspluatatsiya passazhirskikh vagonov (dlya provodnikov) [Arrangement and operation of passenger wagons (for conductors)]. UMTS MPS Rossii Publ. Moscow, 2004. 336 p.
12. GOST 33749-2016. Dempfery gidravlicheskie zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya (Mezhhgosudarstvennyi standart) [State Standard 33749-2016. Hydraulic dampers of railway rolling stock. General technical conditions (Interstate Standard)]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 11 p.
13. Bykov B.V. Konstruktsiya telezhok gruzovykh i passazhirskikh vagonov [Construction of trucks of freight and passenger wagons]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 36 p.
14. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B., Baibakov O.V., Kirillovskii Yu.L. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic actuators]. Moscow: Al'yans Publ., 2010. 423 p.
15. Pastuhov I.F., Pigunov V.V., Koshkalda R.O. Konstruktsiya vagonov [Construction of wagons]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 504 p.

16. Khusidov V.V., Khokhlov A.A., Petrov G.I., Khusidov V.D. Dinamika passazhirskogo vagona i puti modernizatsii telezhki KVZ-TSNII [Dynamics of the passenger wagon and ways of modernization of the KVZ-TSNII trolley]. Moscow: MIIT Publ., 2001. 160 p.

17. Lukin V.V., Anisimov P.S., Koturanov V.N., Khokhlov A.A., Kobishchanov V.V. Konstruirovaniye i raschet vagonov [Designing and calculation of wagons]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 2011. 688 p.

18. Lukin V.V., Shadur L.A., Koturanov V.N., Khokhlov A.A., Anisimov P.S. Konstruirovaniye i raschet vagonov [Designing and calculation of wagons]. Moscow: UMK MPS Rossii Publ., 2000. 731 p.

19. GOST 1452-2011. Pruzhiny tsilindricheskie vintovye telezhok i udarno-tyagovykh priborov podvizhnogo sostava zheleznykh dorog. Tekhnicheskie usloviya (Mezhgosudarstvennyi standart) [State standard 1452–2011. Cylindrical screw springs of bogies and shock-traction devices of railway rolling stock. Technical conditions (Interstate Standard)]. Moscow: Standartinform Publ., 2011. 22 p.

20. Pastukhov I.F., Piginov V.V. Raschet vagonnykh konstruksii metodom konechnykh elementov [Calculation of carriage structures by the finite element method]. Gomel: BIIZhT Publ., 1991. 126 p.

21. Tremblay Thom. Autodesk Inventor 2013 i Inventor LT 2013. Osnovy. Ofitsial'nyi uchebnyi kurs [Autodesk® Inventor® 2013 and Autodesk® Inventor LT™]. Moscow: DMK Press Publ., 2013. 343 p.

### Информация об авторах

**Пригожаев Степан Сергеевич**, аспирант кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: stepri@yandex.ru.

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

**Бурмакин Николай Олегович**, начальник отдела продаж общества с ограниченной ответственностью «Новотэк», г. Иркутск; e-mail: burmakin1243@yandex.ru.

### Information about the authors

**Stepan S. Prigozhaev**, Ph.D. Student of the Department of Physics, mechanics and instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: Stepri@yandex.ru.

**Anatolii A. Pykhalov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Physics, mechanics and instrumentation, Irkutsk State Transport University; Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: pykhalov\_aa@mail.ru.

**Nikolai O. Burmakin**, head of sales department of Limited Liability Company «Novotek», Irkutsk; e-mail: burmakin1243@yandex.ru.

## Разработка методов и современных технических средств, обеспечивающих безопасные условия перевозки пассажиров в период пандемии коронавируса Covid-19

Ю.И. Матяш<sup>1</sup>, А.Д. Родченко<sup>1</sup>✉, А.П. Корнилович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация,

<sup>2</sup>Пассажирское вагонное депо г. Омска, г. Омск, Российская Федерация

✉Rodchenko\_57@mail.ru

### Резюме

В статье предложена пошаговая реализация методов с применением современных технических средств с целью обеспечения безопасных и комфортных условий перевозки пассажиров железнодорожным транспортом в период распространения коронавирусной инфекции. Для их реализации необходимо в первую очередь исключить прямые контакты пассажиров и работников железнодорожных станций с людьми, имеющими признаки заболевания Covid-19. С целью предотвращения проникновения на железнодорожный вокзал пассажиров с подозрением на Covid-19 на входе в здание вокзала проводят сплошной контроль температуры пассажиров (рекомендуем с помощью тепловизионных видеокамер), а также дезинфекцию верхней одежды раствором, который, не повреждая ткань одежды и не оставляя на ней пятен, с большой вероятностью уничтожает болезнетворные вирусы, грибы и бактерии. Поскольку значительная часть железных дорог России граничит со странами, имеющими очаги особо опасных инфекций, следующим шагом становится дезинфекция наружных поверхностей поезда, прибывающего на железнодорожный вокзал, включая дезинфекцию всех наружных поверхностей привокзальной площади. Для исключения проникновения в вагон пассажира с подозрением на Covid-19 проводнику рекомендуем проводить сплошной контроль температуры у пассажиров, проверять наличие проездных документов, включая сведений о проведенной вакцинации от коронавируса (QR-кода или сертификата). Пассажирам с повышенной температурой предложить пройти дополнительное тестирование перед поездкой. Для исключения распространения вируса в процессе перевозки пассажиров, рекомендуем (перед рейсом) проводить очистку и дезинфекцию воздуховодов пассажирских вагонов, например, гранулами сухого льда, а в воздуховодах систем вентиляции устанавливать бактерицидный рециркулятор. Реализация предложенных методов и применение современных технических средств позволяют обеспечивать безопасность условий труда работников сферы непрерывного производства и перевозки пассажиров.

### Ключевые слова

пассажирские перевозки, коронавирус, дезинфекция, санитарная обработка, технические средства, вокзал, проездные документы

### Для цитирования

Матяш Ю.И. Разработка методов и современных технических средств обеспечивающих безопасные условия перевозки пассажиров в период пандемии коронавируса Covid-19 / Ю.И. Матяш, А.Д. Родченко, А.П. Корнилович // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 142–150. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).142-150.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 16.05.2022 г.; поступила после рецензирования: 12.06.2022 г.; принята к публикации: 14.06.2022 г.

## Development of methods and modern technical means ensuring safe transportation of passengers in the conditions of the Covid-19 coronavirus pandemic

Yu.I. Matyash<sup>1</sup>, A.D. Rodchenko<sup>1</sup>✉, A.P. Kornilovich<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Passenger carriage depot Omsk, Omsk, the Russian Federation

✉Rodchenko\_57@mail.ru

### Abstract

The article proposes a step-by-step implementation of methods and modern technical means to ensure safe and comfortable conditions for the transportation of passengers by rail. The implementation of those requires, first of all, any direct contacts between a passenger suspected of having a Covid-19 and railway worker ruled out. In order to prevent passengers with suspected Covid-19 from entering the railway station, continuous monitoring of the body temperature of passengers using thermal imaging cameras at the entrance is recommended as well as disinfecting the outerwear of all passengers with a solution neither damaging the fabric of clothing nor leaving stains on it while, most likely, destroying pathogenic viruses, fungi and bacteria. Since a significant

part of the Russian railways borders with countries that have foci with especially dangerous infections, the next step is to disinfect the outer surfaces of the train arriving at the railway station, including disinfecting all outer surfaces of the station square. To prevent a passenger with suspected Covid-19 from entering the carriage, we recommend that the conductor continuously controls the passengers' body temperature, then checking the availability of travel documents, including the presence of a coronavirus vaccination (QR code or certificate). Passengers with elevated temperatures are encouraged to undergo additional testing before travel. In order to prevent the spread of the virus during the transportation of passengers, we recommend (before the departure) to clean and disinfect the air ducts of passenger cars, e.g., with dry ice granules, and install a bactericidal recirculator in the air ducts of ventilation systems. The step-by-step implementation of the proposed methods and modern technical means allows ensuring safe and comfortable conditions for the continuous production workers and transportation of passengers.

### Keywords

passenger transportation, coronavirus, disinfection, sanitization, technical means, railway station, travel documents

### For citation

Matyash Yu.I., Rodchenko A.D., Kornilovich A.P. Razrabotka metodov i sovremennykh tekhnicheskikh sredstv, obespechivayushchikh bezopasnye usloviya perevozki passazhirov v period pandemii koronavirusa Covid-19 [Development of methods and modern technical means ensuring safe transportation of passengers in the conditions of the Covid-19 coronavirus pandemic]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 142–150. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).142-150.

### Article info

Received: May 16, 2022; revised: June 12, 2022; accepted: June 14, 2022.

### Общие сведения о коронавирусе Covid-19

Вирус – простейшая форма жизни, состоящая из молекул нуклеиновых кислот, заключенных в оболочку из белковых структур, способная инфицировать живые организмы [1, 2].

На рис. 1, а показан способ (механизм) передачи коронавирусной инфекции, а на рис. 1, б – схема ее проникновения в клетки организма.

Разновидности коронавируса (Covid-19) относятся к респираторным вирусам и могут распространяться воздушно-капельным путем (при кашле и чихании) либо контактным – (путем прикосновения к больному человеку, к зараженным поверхностям, например, поручням городского транспорта).

На основании последних исследований установлен механизм разрушительного действия коронавирусной инфекции на организм. Вначале коронавирус попадает в организм (либо воздушно-капельным, либо контактным путем) и закрепляется на поверхности клетки. Далее он проникает вовнутрь клетки, где получает питание и благоприятные условия для размножения. Поскольку процесс размножения вируса протекает очень быстро, то через короткое время происходит разрыв оболочки клетки, и новая колония вирусов продолжает атаковать организм. Стандартные типы вирусов имеют инкубационный период 1–10 дней, у коронавируса он значительно меньше. Вирус Covid-19 способен вызывать пневмонию, которая в некоторых случаях может привести к летальному исходу.

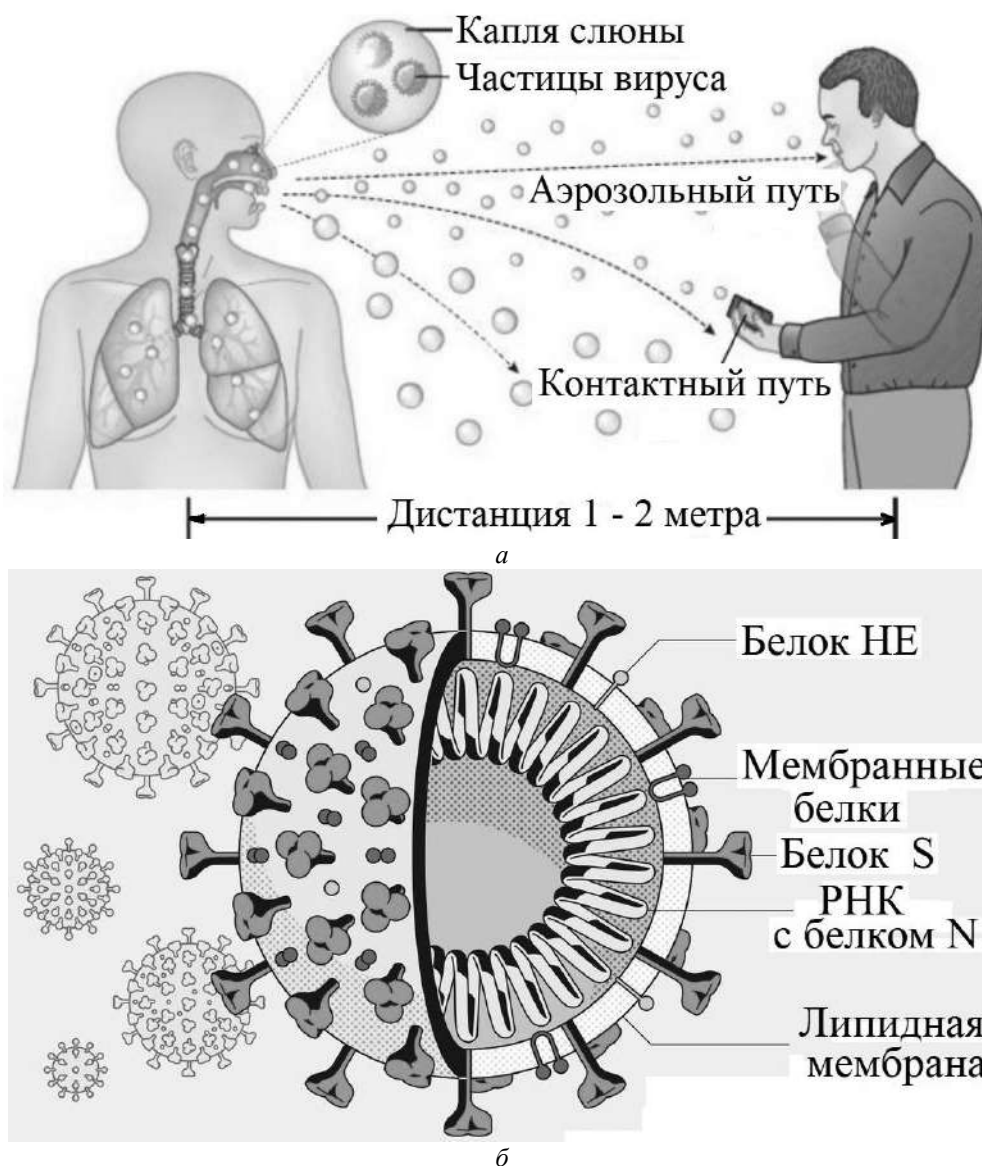
Заболевание коронавирусом сопровождается высокой температурой тела, нарушением обоняния, болями в груди при дыхании и изменением цвета губ, носа и др. [3–5].

### Анализ эффективности ранее разработанных рекомендаций для обеспечения безопасных условий перевозки пассажиров в период пандемии коронавируса Covid-19

Для обеспечения безопасной работы на пассажирских объектах применяется медико-санитарный мониторинг окружающей среды. При ее изменении люди заранее предупреждаются о надвигающейся опасности [6, 7]. Для наблюдения за санитарно-гигиеническим и противозидемическим состоянием на железнодорожных предприятиях была создана рабочая группа международного союза железных дорог по борьбе с Covid-19. В результате ее деятельности на вокзалах были оборудованы помещения с необходимыми средствами термометрии и индивидуальной защиты. Кроме этого, пассажиропотоки разделены по территории вокзалов, что обеспечивает соблюдение социальной дистанции между пассажирами.

Однако принятых мероприятий оказалось недостаточно, чтобы обеспечить комфортную и безопасную перевозку пассажиров от железнодорожной станции формирования до железнодорожной станции оборота и обратно, что подтверждается данными статистики заболеваемости коронавирусом Covid-19 [8, 9].





**Рис. 1.** Способы (механизмы) передачи коронавирусной инфекции (а), схема проникновения коронавирусной инфекции в клетки организма (б)  
**Fig. 1.** Methods (mechanisms) of transmission of the corona-viral infection (a), the scheme of penetration of the corona-virus infection into the cells of the body (b)

Так, например, общее количество смертельных случаев в России от Covid-19 превысило 1 млн чел. В статье предложены методы и современные технические средства, направленные на обеспечение комфортных и безопасных условий перевозки пассажиров:

1. Приобретение проездных документов (независимо от метода) осуществляется только при наличии сведений о прохождении вакцинации от коронавируса (QR-кода или сертификата).

2. Регистрацию пассажиров проводят только при наличии у пассажира прививки от коронавируса (QR-кода или сертификата), ко-

торую совмещают со сплошным контролем температуры пассажиров, используя для этого тепловизионные видеокамеры (рис. 2, а). Пассажирам с повышенной температурой предлагают пройти дополнительное тестирование перед поездкой, а при отсутствии у пассажира сертификата о прививке, он не допускается к поездке. Наряду с этим на входе здание железнодорожного вокзала дополнительно проводят дезинфекцию верхней одежды, например, с помощью рамки (рис. 2, б). Металлический каркас рамки снабжен встроенным механизмом, обеспечивающим опрыскивание пассажиров дезин-

фицирующим раствором, в качестве которого используется однопроцентный гипохлорит натрия, уничтожающий болезнетворные бактерии и вирусы и не оставляющий следов и пятен на одежде.

Для проведения дезинфекции, человек проходит через рамку. В это время дезинфицирующий раствор распыляется в виде тумана (на человека расходуется всего 500–800 мл, время обработки составляет – 5–7 сек.) [10].



*a*



*б*

**Рис. 2.** Проводимые профилактические мероприятия на железнодорожном вокзале:  
*a* – контроль температуры с помощью тепловизионных видеокамер;

*б* – использование рамки для дезинфекции

**Fig. 2.** Preventive actions at the railway station:

*a* – temperature control with thermal imaging cameras; *b* – using the disinfection frame

3. Следующим этапом в реализации предложенных методов является проведение дезинфекций прибывающего поезда на железнодорожный вокзал и привокзальной площади. Это объясняется тем, что примерно третья часть железных дорог Российской Федерации проходит через территории и граничит со странами, имеющими очаги заражения коронавирусом. Поэтому проблемными вопросами являются санитарное состояние наружных поверх-

ностей поезда, прибывающего на железнодорожный вокзал, а также санитарное состояние самой привокзальной площади.

Для дезинфекции прибывающего на железнодорожный вокзал поезда предлагается на подходах к железнодорожным станциям располагать дезинфицирующие туннели (длиной 20 м и шириной 10 м), внутри которых устанавливают трубы с форсунками (рис. 3). В качестве дезинфицирующего раствора рекомендуем од-



**Рис. 3.** Дезинфицирующие туннели, установленные перед железнодорожными станциями для обеззараживания поезда, прибывающего на железнодорожный вокзал

**Fig. 3.** Disinfecting tunnels installed in front of railway stations to decontaminate a train arriving at the station



**Рис. 4.** Механизированный метод дезинфекции привокзальной площади

**Fig. 4.** Mechanized method of disinfection of the forecourt area

нопроцентный гипохлорит натрия (по аналогии с раствором, используемым для дезинфекции людей). Для обеспечения высокой скорости обеззараживания поезда применяют два насоса и емкости для подачи и слива использованных вод. Для дезинфекции привокзальной площади рекомендуется использовать поливочные машины с форсунками (рис. 4), а в качестве дезинфицирующего раствора также применять однопроцентный гипохлорит натрия, эффективно уничтожающий вирусы и другие болезнетворные бактерии.

### Подготовка пассажирского вагона перед рейсами

Для предупреждения распространения вируса на железнодорожном транспорте в период пандемии Covid-19, наряду с дезинфекцией привокзальной площади и поездов необходимо перед рейсом обеспечить дезинфекцию внутренних поверхностей пассажирских вагонов, включая воздуховоды систем вентиляции. В противном случае в значительной мере повышается риск распространения заболевания, поскольку в воздуховодах системы вентиляции могут скапливаться миллионы спор вируса на квадратный сантиметр их поверхностей, причем их число быстро увеличивается в среде влажного и теплого воздуха. Чтобы решить данную проблему предлагается использовать установку (рис. 5), позволяющую очищать воздуховоды пассажирских вагонов гранулами сухого льда.

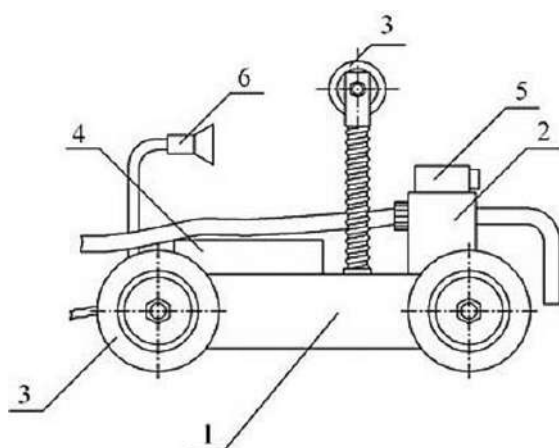


Рис. 5. Установка для очистки поверхностей воздуховодов пассажирских вагонов гранулами сухого льда

Fig. 5. Installation for cleaning the surfaces of air ducts of passenger cars with dry ice granules

Установка для очистки воздуховодов в пассажирских вагонах представляет собой самоходный модуль (1), оснащенный системой дистанционного управления (2), который, перемещаясь по вентиляционному воздуховоду, проводит очистку его поверхности гранулами сухого льда, а его качество фиксируется видеокамерой и передается на экран монитора оператора [11–14].

Поскольку в пассажирских поездах коронавирус передается воздушно-капельным путем, рекомендуется устанавливать бактерицидный рециркулятор типа «Мегалит» (рис. 6).

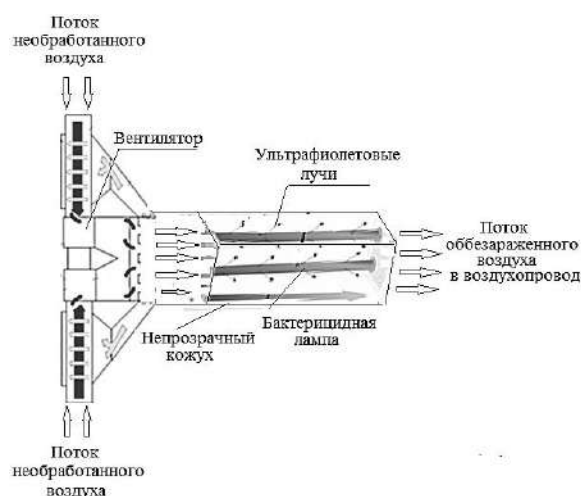


Рис. 6. Принципиальная схема работы бактерицидного рециркулятора воздуха  
Fig. 6. Schematic diagram of the operation of a bactericidal air recirculator

Бактерицидный рециркулятор воздуха устанавливают в воздуховоде системы вентиляции пассажирского вагона. Необеззараженный поток воздуха вентилятором пропускается через ультрафиолетовое излучение (бактерицидные лампы), расположенные в непрозрачном кожухе, где он обеззараживается (болезнетворные микробы уничтожаются) и затем поступает в салон вагона.

Прибор компактный и легкий, его работа безопасна в присутствии людей и животных благодаря бесшумному вентилятору и непрозрачному закрытому корпусу. Такое оборудование очистки и обеззараживания воздуха установлено в 160 поездах «Сапсан» и 845 поездах «Ласточка». Модернизированные и вновь построенные пассажирские вагоны дальнего следования оборудуются системами очистки и обеззараживания воздуха [15].

### Организация посадки пассажиров в вагон

Главная задача, стоящая перед поездной бригадой пассажирского поезда, – не допустить в поезд пассажира с подозрением на Covid-19. Для этого перед посадкой в вагон проводниками бесконтактным термометром измеряется у пассажиров температура тела (рис. 7).

Проводник вагона вначале выполняет сплошной контроль температуры пассажиров, а затем проводит регистрацию проездных документов и документа, удостоверяющего наличие у пассажира прививки от коронавируса (QR-кода или сертификата). Пассажирам с повышенной температурой, а также при отсутствии QR-кода или сертификата о прививке предлагают пройти дополнительное тестирование перед посадкой в вагон либо не допускают к поездке.

### Обслуживание пассажиров в поездах формирования АО «Федеральная пассажирская компания»

Железнодорожные пассажирские вагоны в пути следования от станции формирования до станции оборота и обратно подвергаются санитарной обработке не реже двух раз в сутки. Проводится обязательная протирка всех ручек в вагоне раствором дезинфицирующего средства. Убираются помещения туалетов, обязательно моются полы и стены на высоту полутора метров не менее четырех раз в сутки с применением дезинфицирующих средств. При выявлении пасса-

жиров с симптомами, похожими на инфекционное заболевание, организуется внеплановая дезинфекция съемного мягкого имущества в вагоне, а заболевших пассажиров изолируют (пересаживают в отдельное купе) и вызывают скорую медицинскую помощь на железнодорожную станцию, следующую по расписанию остановок. В случае резкого ухудшения состояния пассажиров (появлении высокой температуры, сильном кашле, признаках дыхательной недостаточности и др.) обеспечивают неграфиковую остановку поезда на ближайшей железнодорожной станции, на которую была вызвана машина скорой помощи для оказания медицинской помощи и госпитализации заболевших пассажиров.

Питание пассажиров обеспечивается работниками вагонов-ресторанов только на вынос. Работники обеспечивают пассажиров гелем для обработки рук, медицинскими масками и перчатками, с возможной их заменой не реже чем через три часа. Во внутренних помещениях вагона-ресторана проводится дезинфекция специальными средствами, которые уничтожают вирусы (обработка проводится два раза в день).

### Обеззараживание воды в пути следования пассажиров

В современных условиях чистоте питьевой воды в железнодорожных вагонах уделяют повышенное внимание, так как заражение желудочно-кишечной инфекцией пассажиров может доставить не меньше вреда, чем вирусы. Современ-



а



б

Рис. 7. Общий вид бесконтактного термометра (а) и измерение проводниками температуры у пассажиров перед посадкой их в вагон (б)

Fig. 7. General view of a non-contact thermometer (a) and conductors measuring the temperature of passengers before boarding them in the carriage (b)

ные пассажирские вагоны оборудуются автоматическими устройствами (автоматами), которые позволяют обеззараживать воду и раздавать ее пассажирам.

Применение обеззараживающих технологий с многоступенчатой системой угольных фильтров обеспечивает высокое качество очищенной воды [16–18].

## Заключение

В современных условиях, когда существует большая доля вероятности заражения коронавирусом, рассмотренные в статье методы и технические средства помогут создать условия для безопасной перевозки пассажиров железнодорожным транспортом.

## Список литературы

1. Про болезни // ПроБолезни : сайт. URL: <https://probolezny.ru /koronavirusnaya-infekciya/> (Дата обращения: 03.11.2021).
2. Vital Surveillances: The Epidemiological Characteristics of an Outbreak of 2019 Novel Coronavirus Diseases (COVID-19) - China, 2020 / Zhonghua Liu Xing Bing Xue Za Zhi. // China CDC Weekly. 2020. Vol. 2. No. 8. pp. 113–122. URL: <https://weekly.chinacdc.cn/en/article/id/e53946e2-c6c4-41e9-9a9b-fea8db1a8f51>. (Дата обращения: 03.11.2021).
3. COVID-19 Monitoring and data dashboard : site Italian National Civil Protection Department. URL: <http://opendatadpc.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html#/b0c68bce2cce478eaac82fe38d4138b1> (Дата обращения: 12.11.2021).
4. Coronavirus disease 2019 (COVID-19) in the EU/EEA and the UK—eleventh update: resurgence of cases. Stockholm, Sweden : European Centre for Disease Prevention and Control, 2020. URL: <https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/covid-19-rapid-risk-assessment-20200810.pdf> (Дата обращения: 13.11.2021).
5. Что нужно знать об уровне санитарной безопасности в пассажирских поездах // Российская газета. 2020. 15 июля. Интернет-портал. URL: <https://rg.ru/2020/07/15/chto-nado-znat-ob-urovne-sanitarnoj-bezopasnosti-v-passazhirskih-poezdah.html> (Дата обращения: 01.11.2021).
6. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения : федерал. закон от 30 марта 1999 г. N 52-ФЗ. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_22481/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22481/) (Дата обращения: 10.11.2021). Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс».
7. Меры по борьбе с COVID-19 : рабочая группа МСЖД по COVID-19. Paris : Международный союз железных дорог (МСЖД), 2020. URL: [https://uic.org/IMG/pdf/4\\_back\\_on\\_tracks\\_tru.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/4_back_on_tracks_tru.pdf) (Дата обращения: 03.11.2021).
8. Статистика коронавируса в России : сайт. URL: <https://coronavirus-tracking.ru/> (Дата обращения: 08.11.2021).
9. В России зафиксировали новый максимум смертей от COVID-19 за сутки // РИА Новости. 2021. окт. Электрон. журн. URL: <https://ria.ru/20211020/koronavirus-1755353139.html> (Дата обращения: 21.10.2021).
10. Как работает рамка для дезинфекции людей: плюсы и минусы // Все о дезинфекции : сайт. URL: <https://dezinfek.ru/oborudovanie/ramka-dlya-dezinfeksii-lyudej> (Дата обращения: 13.11.2021).
11. Семенов А.П. Совершенствование системы технического обслуживания воздухопроводов пассажирских вагонов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2010. 16 с.
12. О введении в действие Санитарных правил по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте СП 2.5.1198-03 : постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 04.03.2003 N 12 в ред. от 16.04.2010 // ZakonBase.ru : сайт. URL: <https://zakonbase.ru/content/base/153478?> (Дата обращения: 12.11.2021).
13. Матяш Ю.И., Семенов А.П. Исследования физико-химической природы загрязнений воздухопроводов пассажирских вагонов // Динамика систем, механизмов и машин. 2007. № 3. С. 198–202.
14. Матяш Ю.И., Семенов А.П. Очистка воздухопроводов пассажирских вагонов // Железнодорожный транспорт. 2009. № 12. С. 48–50.
15. Применение бактерицидных рециркуляторов воздуха на транспорте // Бактерицидные рециркуляторы и облучатели : сайт. URL: <https://www.bakt.ru/closed/transportation/> (Дата обращения: 08.11.2021).
16. Nurhadi, Suryadari R.T. Understanding changes in perceptions and behaviour of train passengers during the Covid 19 pandemic // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 824 012107. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/824/1/012107/pdf> (Дата обращения: 12.11.2021).
17. Матяш Ю.И., Томилова О.С. Устройство для обеззараживания воды в пассажирских поездах дальнего следования // известия Транссиба. 2010. № 4. С. 23–27.
18. Ultraviolet Light in Food Technology: Principles and Applications / Da-Wen Sun, T.N. Koutchma, L.J. Forney et al // Contemporary food engineering. Boca Raton London New York. CRC Press. Taylor & Francis Group. 2009. 300 p.

## References

1. Pro bolezni (Elektronnyi resurs) [About illnesses (Electronic recourse)]. Available at: <https://probolezny.ru /koronavirusnaya-infekciya/> (Accessed November 3, 2021).
2. Vital Surveillances: The Epidemiological Characteristics of an Outbreak of 2019 Novel Coronavirus Diseases (COVID-19) - China, 2020 / Zhonghua Liu Xing Bing Xue Za Zhi. // China CDC Weekly. 2020. Vol. 2. No. 8. pp. 113–122. URL: <https://weekly.chinacdc.cn/en/article/id/e53946e2-c6c4-41e9-9a9b-fea8db1a8f51>. (Accessed November 3, 2021).

3. COVID-19 Monitoring and data dashboard : site Italian National Civil Protection Department. URL: <http://opendatadpc.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html#/b0c68bce2cce478eaac82fe38d4138b1> (Accessed November 12, 2021).

4. Coronavirus disease 2019 (COVID-19) in the EU/EEA and the UK—eleventh update: resurgence of cases. Stockholm, Sweden : European Centre for Disease Prevention and Control, 2020. URL: <https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/covid-19-rapid-risk-assessment-20200810.pdf> (Accessed November 13, 2021).

5. Chto nuzhno znat' ob urovne sanitarnoi bezopasnosti v passazhirskikh poezdakh (Elektronnyi resurs) [What you need to know about the level of sanitary safety in passenger trains (Electronic resource)]. Available at: <https://rg.ru/2020/07/15/chtonado-znat-ob-urovne-sanitarnoj-bezopasnosti-v-passazhirskikh-poezdah.html> (Accessed November 1, 2021).

6. Federal'nyi zakon ot 30 marta 1999 g. N 52-FZ «O sanitarno-epidemiologicheskoy blagopoluchii naseleniya» (s izmeneniyami i dopolneniyami) (Elektronnyi resurs) [Federal Law of March 30, 1999 no 52-FL «On the Sanitary and Epidemiological Welfare of the Population» (with amendments and additions) (Electronic resource)]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_22481/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22481/) (Accessed November 10, 2021).

7. Rabochaya gruppa MSZhD po COVID-19 (Elektronnyi resurs) [Working Group on COVID-19 (Electronic resource)]. Available at: [https://uic.org/IMG/pdf/4\\_back\\_on\\_tracks\\_tru.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/4_back_on_tracks_tru.pdf) (Accessed November 3, 2021).

8. Statistika koronavirusa v Rossii (Elektronnyi resurs) [Statistics of coronavirus in Russia (Electronic resource)]. Available at: <https://coronavirus-tracking.ru/> (Accessed November 8, 2021).

9. V Rossii zafiksirovali novyi maksimum smertei ot COVID-19 za sutki (Elektronnyi resurs) [In Russia, a new maximum of deaths from COVID-19 per day was recorded (Electronic resource)]. Available at: <https://ria.ru/20211020/koronavirus-1755353139.html> (Access October 21, 2021).

10. Kak rabotaet ramka dlya dezinfektsii lyudei: plyusy i minusy (Elektronnyi resurs) [How the frame for disinfection of people works: pros and cons (Electronic resource)]. Available at: <https://dezinfekc.ru/oborudovanie/ramka-dlya-dezinfektsii-lyudej> (Accessed November 13, 2021).

11. Semenov A.P. *Sovershenstvovanie sistemy tehničeskogo obsluzhivaniya vozdukhovodov passazhirskikh vagonov* [Improvement of the system of maintenance of air ducts of passenger wagons]. Ph.D's thesis, Omsk, 2010, 16 p.

12. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 04.03.2003 N 12 (red. ot 16.04.2010) «O vvedenii v dejstvie «Sanitarnykh pravil po organizacii passazhirskikh perevozok na zheleznodorozhnom transporte SP 2.5.1198-03» [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 04.03.2003 no 12 (ed. April 16, 2010) «On the introduction of Sanitary Rules for the organization of passenger transportation by rail SR 2.5.1198-03»]. Available at: <https://zakonbase.ru/content/base/153478> (Accessed November 12, 2021).

13. Matyash Yu.I., Semenov A.P. Issledovaniya fiziko-khimicheskoi prirody zagryaznenii vozdukhovodov passazhirskikh vagonov [Studies of the physical and chemical nature of pollution in the air ducts of passenger wagons]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines], 2007, no. 3, pp. 198–202.

14. Matyash Yu.I., Semenov A.P. Ochistka vozdukhovodov passazhirskikh vagonov [Cleaning of air ducts of passenger wagons]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2009, no. 12, pp. 48 – 50.

15. Primenenie bakteritsidnykh retsirkulyatorov vozdukh na transporte (Elektronnyi resurs) [Application of bactericidal air recirculators in transport (Electronic resource)]. Available at: <https://www.bakt.ru/closed/transportation/> (Accessed November 8, 2021).

16. Nurhadi, Suryadari R.T. Understanding changes in perceptions and behaviour of train passengers during the Covid 19 pandemic // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 824 012107. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/824/1/012107/pdf> (Accessed November 12, 2021).

17. Matyash Yu.I., Tomilova O.S. Ustroistvo dlya obezrazhivaniya vody v passazhirskikh poezdakh dal'nego sledovaniya [Device for water disinfection in long-distance passenger trains]. *Izvestia Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2010, no. 4, pp. 23 – 27.

18. Koutchma T.N. Ultraviolet Light in Food Technology: Principles and Applications / Da-Wen Sun, T.N. Koutchma, L.J. Forney, C.I. Moraru // Contemporary food engineering. Boca Raton London New York. CRC Press. Taylor & Francis Group. 2009. 300 p.

### Информация об авторах

**Матяш Юрий Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: [matyash41@mail.ru](mailto:matyash41@mail.ru).

**Родченко Александр Дмитриевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: [Rodchenko\\_57@mail.ru](mailto:Rodchenko_57@mail.ru).

**Корнилович Алексей Петрович**, начальник Пассажирского вагонного депо Омск, г. Омск; e-mail: [KornilovichAP-2sib@fps.ru](mailto:KornilovichAP-2sib@fps.ru).

### Information about the authors

**Yurii I. Matyash**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Wagons and wagon facilities, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: [matyash41@mail.ru](mailto:matyash41@mail.ru).

**Alexander D. Rodchenko**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Wagons and wagon facilities, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: [rodchenko\\_57@mail.ru](mailto:rodchenko_57@mail.ru).

**Alexei P. Kornilovich**, Chief of the Passenger carriage depot Omsk, Omsk; e-mail: [KornilovichAP-2sib@fps.ru](mailto:KornilovichAP-2sib@fps.ru).

## Моделирование режимов компактных линий электропередачи, питающих тяговые подстанции

Е.В. Воронина<sup>1</sup>, А.В. Крюков<sup>1,2</sup>, А.Д. Степанов<sup>1</sup>✉, И.А. Фесак<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉irkutsk-energo@yandex.ru

### Резюме

Осуществляемое в настоящее время техническое перевооружение электроэнергетических систем базируется на использовании технологий интеллектуальных электрических сетей. Одна из главных задач, решаемых на этой основе, состоит в увеличении пропускной способности линий электропередачи, снижении потерь и улучшении качества электроэнергии. Для решения этих задач можно использовать линии электропередачи компактного типа, которые отличаются сложными конструкциями расщепленных фаз и сближением токоведущих частей на минимально допустимые расстояния за счет использования изоляционных распорок. В статье описаны результаты компьютерного моделирования, проведенного для типовой системы электроснабжения железной дороги, тяговые подстанции которой подключались к сетям 220 кВ, выполненным компактными воздушными линиями электропередачи. Цель исследования состояла в определении количественных показателей, характеризующих качество электроэнергии и энергетическую эффективность. Моделирование осуществлялось в фазных координатах на основе методов и алгоритмов, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения и реализованных в программном комплексе Fazonord. Рассматривалась система электроснабжения с контактными сетями 25 кВ. Во внешней сети предполагалось использование различных типов компактных воздушных линий с коаксиальным, секторным и линейным расположением проводов. По полученным результатам можно сформулировать следующий вывод: при использовании компактных воздушных линий напряжения на токоприемниках электроподвижного состава стабилизируются и не выходят за допустимые пределы; потери в тяговой сети уменьшаются; улучшаются показатели, характеризующие качество электроэнергии. Из восьми рассмотренных типов компактных воздушных линий наилучшими показателями обладает компактная линия с трехсегментным расположением проводов. Однако конструкция такой линии электропередачи является достаточно сложной и требует повышенных затрат на строительство.

### Ключевые слова

компактные воздушные линии, системы тягового электроснабжения, моделирование, качество электроэнергии и энергетическая эффективность

### Для цитирования

Моделирование режимов компактных линий электропередачи, питающих тяговые подстанции / Е.В. Воронина, А.В. Крюков, А.Д. Степанов, И.А. Фесак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 151–162. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).151-162.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 27.05.2022 г.; поступила после рецензирования: 9.06.2022 г.; принята к публикации: 10.06.2022 г.

### Благодарность

» « , Smart Grid, -  
», - 20-120111690029-4 16  
ноября 2020 г.

## Modeling the modes of compact transmission lines feeding traction substations

E.V. Voronina<sup>1</sup>, A.V. Kryukov<sup>1,2</sup>, A.D. Stepanov<sup>1</sup>✉, I.A. Fesak<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉irkutsk-energo@yandex.ru

### Abstract

The current technical re-equipment of electric power systems is based on the use of smart grid technologies. One of the main tasks to be solved on this basis is to increase the capacity of power lines, reduce losses and improve the quality of electricity. To



solve these problems, compact-type power lines can be used, which are distinguished by complex structures of split phases and the convergence of current-carrying parts to the minimum allowable distances due to the use of insulating spacers. The article describes the results of computer simulation performed for a typical railway power supply system, the traction substations of which were connected to 220 kV networks made by compact overhead power lines. The purpose of the research was to determine quantitative indicators characterizing the quality of electricity and energy efficiency. Modeling was carried out in phase coordinates based on methods and algorithms developed at the Irkutsk State Transport University and implemented in the Fazonord software package. The power supply system of the main railway with 25 kV traction networks was considered. To connect traction substations to the electric power system, the use of various types of compact overhead power lines with coaxial, sectoral and linear wire arrangement was supposed. Based on the results obtained, the following conclusion can be formulated: when using compact overhead power lines, the voltages on the current collectors of the electric rolling stock stabilize and do not go beyond the permissible limits; losses in the traction network are reduced; indicators characterizing the quality of electricity are improved. Of the eight considered types of compact overhead power lines, the best performance has a compact line with a three-segment arrangement of wires. However, the design of such a transmission line is quite complex and requires increased construction costs.

### Keywords

compact overhead lines, railway power supply systems, modeling, power quality and energy efficiency

### For citation

Voronina E.V., Kryukov A.V., Stepanov A.D., Fesak I.A. Modelirovanie rezhimov kompaktnykh linii elektroperedachi, pitayushchikh tyagovye podstantsii [Modeling the modes of compact transmission lines feeding traction substations]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 151–162. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).151-162.

### Article Info

Received: May 27, 2022; revised: June 9, 2022; accepted: June 10, 2022.

### Acknowledgement

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

Электрифицированные железные дороги относятся к крупным и пространственно распределенным потребителям электроэнергии, требующим надежного и эффективного энергообеспечения тяги поездов и стационарных объектов транспортной инфраструктуры. Для решения таких задач в современных условиях осуществляется техническое перевооружение электроэнергетических систем (ЭЭС), которое базируется на использовании технологий интеллектуальных электрических сетей. Одно из важных направлений реализации этих технологий состоит в использовании линий электропередач (ЛЭП) компактного типа, которые отличаются сложными конструкциями расщепленных фаз и сближением токоведущих частей на минимально допустимые расстояния за счет использования изоляционных распорок.

Вопросам разработки и исследования режимов ЭЭС, оснащенных компактными высоковольтными линиями (КВЛ), посвящено большое число отечественных и зарубежных работ. Основные теоретические аспекты создания КВЛ изложены в книге [1]. В статье [2] описаны режимные особенности компактных

линий напряжением 220 кВ. Вопросам создания КВЛ высокого напряжения посвящена работа [3]. Результаты оценки пропускной способности КВЛ приведены в работе [4]. Вопросы надежности, экономичности и качества КВЛ рассмотрены в статье [5]. Конструктивным особенностям КВЛ посвящены работы [6, 7]. Новые технические решения для каналов передачи электроэнергии, включающие КВЛ, описаны в монографии [8]. Определению эффективности применения компактных управляемых ЛЭП посвящены статьи [9, 10]. Результаты экспериментального определения минимального расстояния подхода для работы под напряжением на малогабаритной ЛЭП сверхвысокого напряжения 1 000 кВ приведены в работе [11]. Исследованию вопросов перенапряжений в КВЛ 500 кВ посвящена статья [12]. Анализ электромагнитных полей КВЛ 150 кВ приведен в статьях [13, 14]. Основные характеристики КВЛ представлены в работе [15].

В перспективе возможно применение КВЛ в сетях, которые питают тяговые подстанции (ТП) магистральных железных дорог 25 и 2×25 кВ. В условиях цифровизации транспорт-

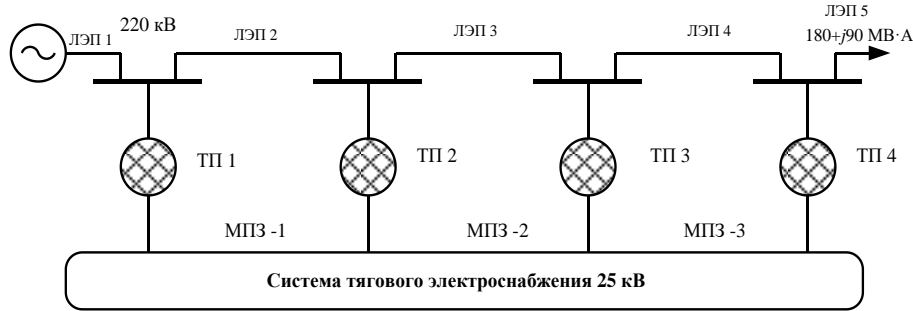
ной электроэнергетики для оценки эффективности таких технических решений должны использоваться компьютерные технологии. Для решения этой задачи выполнены исследования, результаты которых описаны далее.

**Результаты моделирования**

Моделирование выполнено в программном комплексе Fazonord [16] на основе мето-

дов, описанных в работах [16–18]. Рассматривалась система электроснабжения, включающая внешнюю сеть 220 кВ, четыре ТП и три межподстанционных зоны (МПЗ) (рис. 1).

Моделирование проведено в двух вариантах. В первом – питающая сеть 220 кВ была выполнена типовыми линиями с проводами АС-600 (рис. 2), а во втором питающие ЛЭП имели компактную конструкцию (рис. 3). Диа-



25 kV traction power supply system

Рис. 1. Схема сети

Fig. 1. Network scheme

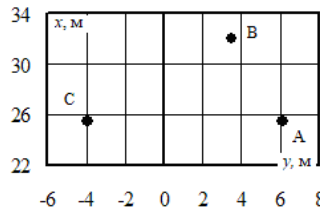


Рис. 2. Координаты расположения проводов линии электропередач типовой конструкции

Fig. 2. Wire location coordinates for the power line of standard design

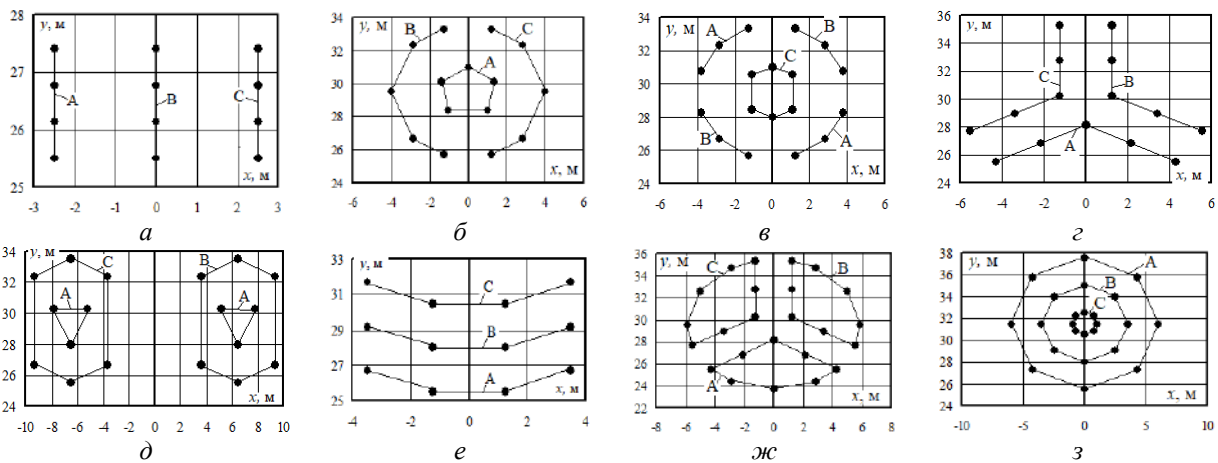


Рис. 3. Координаты расположения проводов линии электропередачи компактного типа:

- a* – с вертикальным расположением проводов; *б* – коаксиальная двухсегментная;
- в* – коаксиальная четырехсегментная; *г* – треугольная; *д* – двойная коаксиальная; *е* – параболическая;
- ж* – трехсегментная; *з* – концентрическая

Fig. 3. Location coordinates of the compact-type power line wires:

- a* – with vertical arrangement of wires; *b* – coaxial two-segment;
- c* – coaxial four-segment; *d* – triangular;
- e* – double coaxial; *f* – parabolic; *g* – three-segment; *h* – concentric compact type

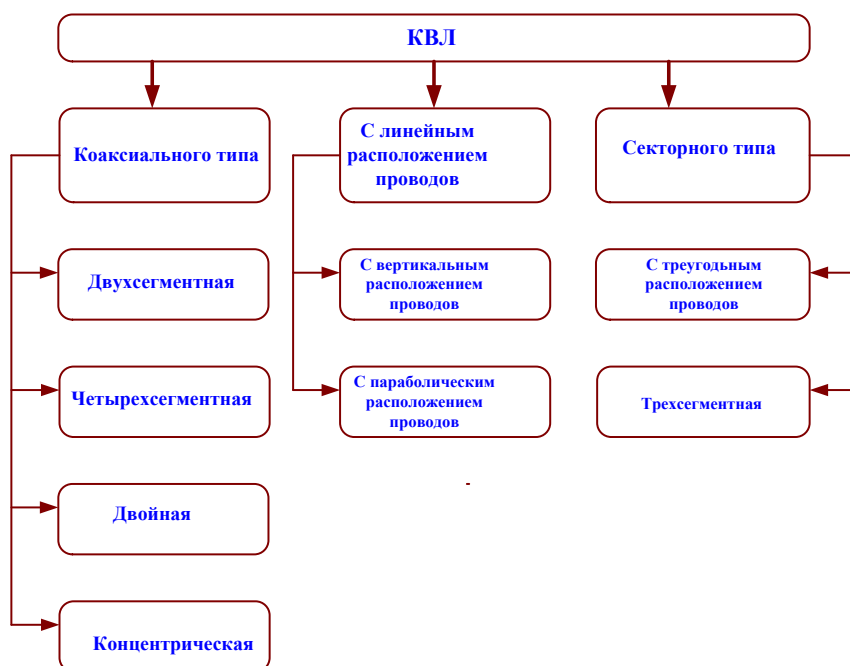


Рис. 4. Классификация компактных высоковольтных линий

Fig. 4. Classification of compact high-voltage lines

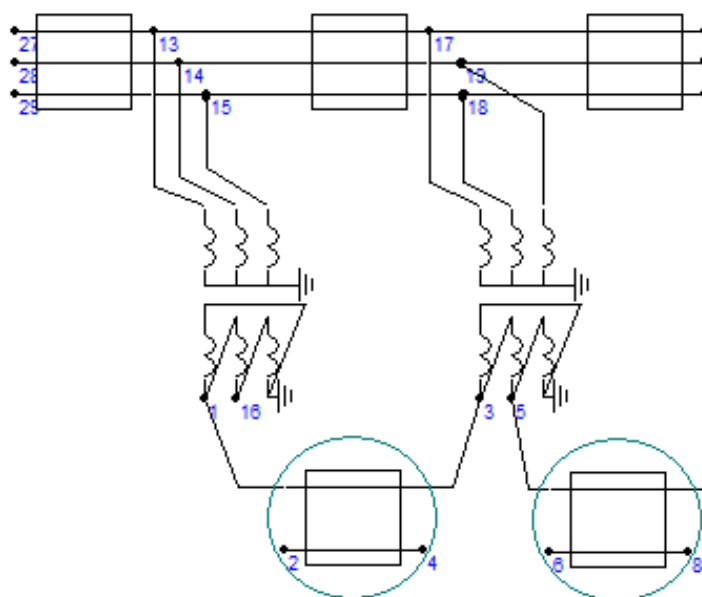


Рис. 5. Фрагмент схемы расчетной модели, реализованной в программном комплексе Fazonord

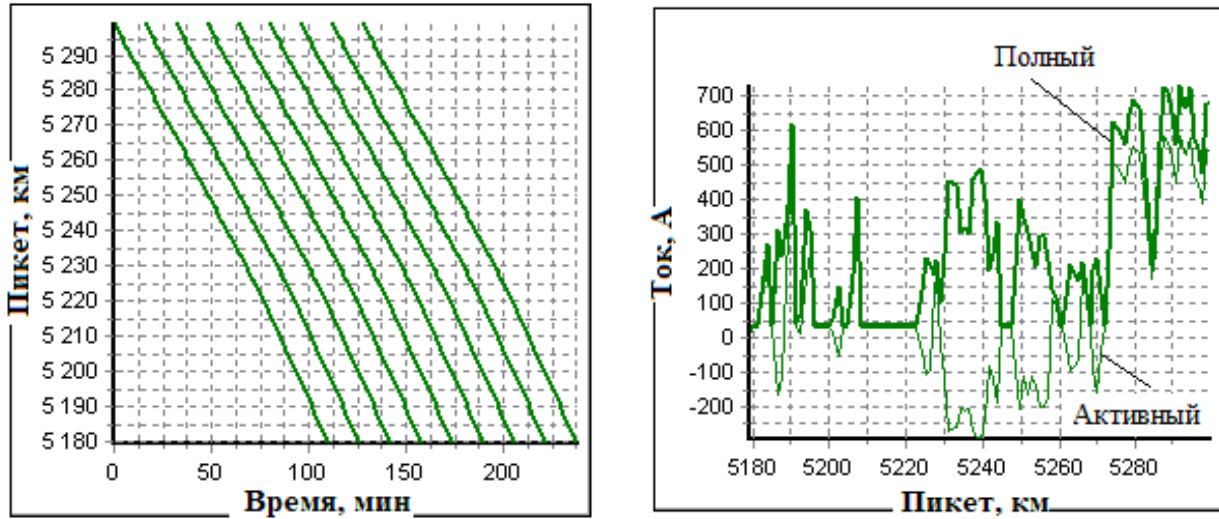
Fig. 5. Fragment of a calculated model scheme implemented in Fazonord software complex

грамма, отвечающая классификации КВЛ, приведена на рис. 4. Рассматриваемые КВЛ можно разделить на три группы: коаксиального типа; с линейным расположением проводов; секторного типа.

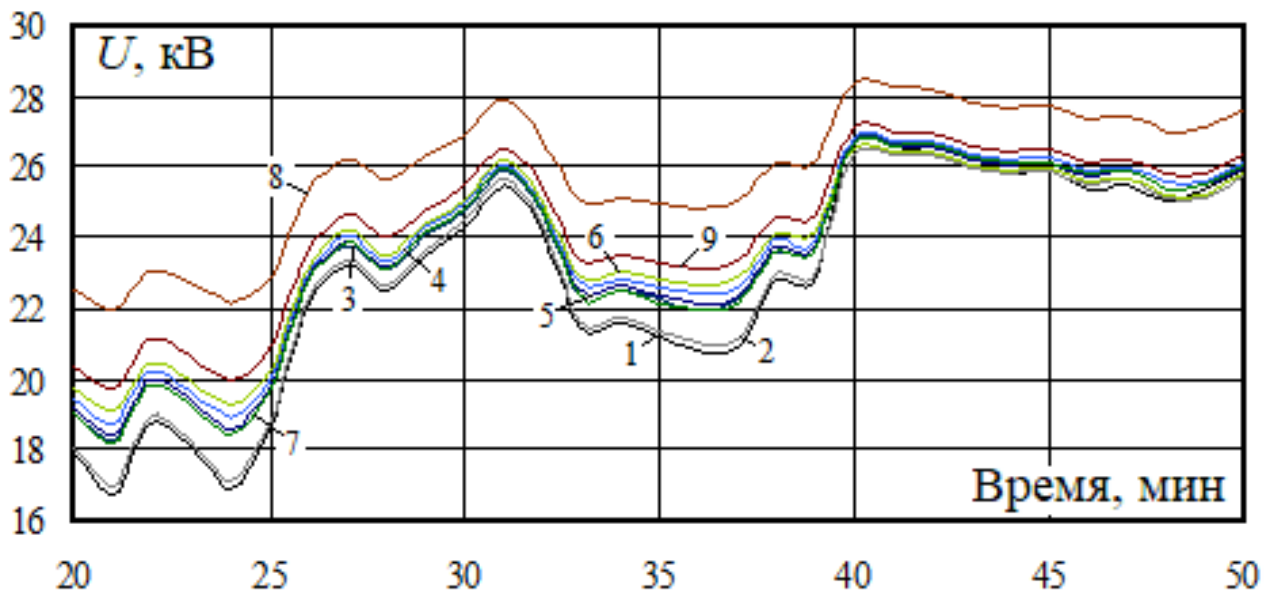
Рассмотрено восемь конструкций КВЛ.

На рис. 5 представлена часть схемы расчетной модели, включая три ЛЭП, две ТП и два

участка контактной сети. Рассматривался пропуск девяти поездов массой 4 084 т (рис. 6, а). На рис. 6, б показана зависимость потребляемого электровозом тока от расстояния. Результаты моделирования в виде максимальных значений показателей сведены в табл. На рис. 7–12 показаны графики, отвечающие изменениям рассматриваемых показателей во времени.



*a* *б*  
**Рис. 6.** График движения (*a*) и токовый профиль поезда (*б*)  
**Fig. 6.** Traffic schedule (*a*) and current profile (*b*) of the train



**Рис. 7.** Напряжение на токоприемнике электровоза первого поезда:

1 – трехфазная линия электропередачи с проводами АС-600; 2 – компактная воздушная линия с вертикальным расположением проводов; 3 – коаксиальная двухсегментная компактная воздушная линия; 4 – коаксиальная двухсегментная компактная воздушная линия; 5 – компактная воздушная линия с треугольным расположением проводов; 6 – двойная коаксиальная компактная воздушная линия; 7 – компактная воздушная линия с параболическим расположением проводов; 8 – компактная воздушная линия с трехсегментным расположением проводов; 9 – компактная воздушная линия с концентрическим расположением проводов

**Fig. 7.** Voltage in the current collector of the first train's locomotive:

1 – three-phase power line with АС-600 wires; 2 – compact overhead line with vertically arranged wires; 3 – coaxial two-segment compact overhead line; 4 – coaxial two-segment compact overhead line; 5 – compact overhead line with triangular arrangement of wires; 6 – double coaxial compact overhead line; 7 – compact overhead line with parabolic arrangement of wires; 8 – compact overhead lines with three-segment arrangement of wires; 9 – compact overhead line with concentric arrangement of wires

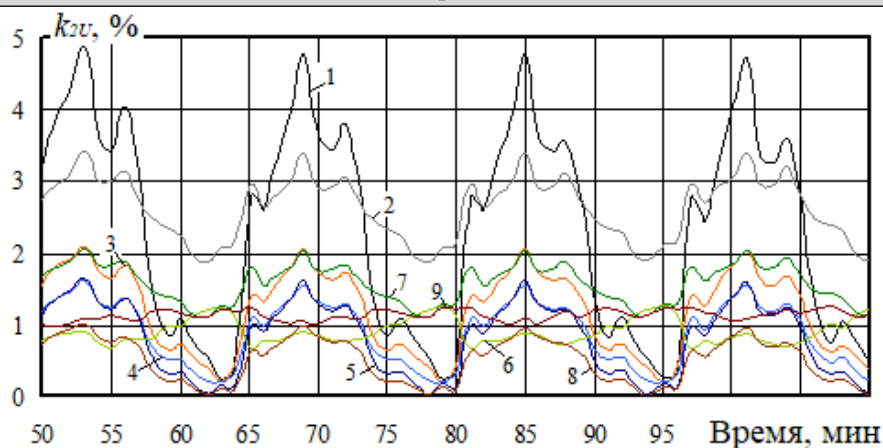


Рис. 8. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ тяговой подстанции №4

(цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 8. Unbalance factors by reverse sequence on the 220 kV busbars of traction substation no 4 (digital denominations correspond to fig. 7)

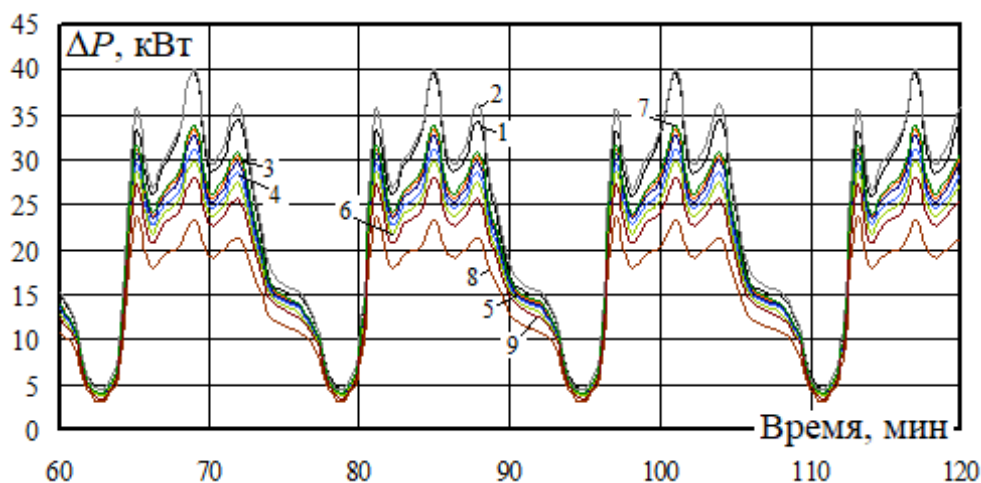


Рис. 9. Потери мощности в тяговой сети МПЗ-2 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 9. Power loss in traction network substation zone-2 (digital denominations correspond to fig. 7)

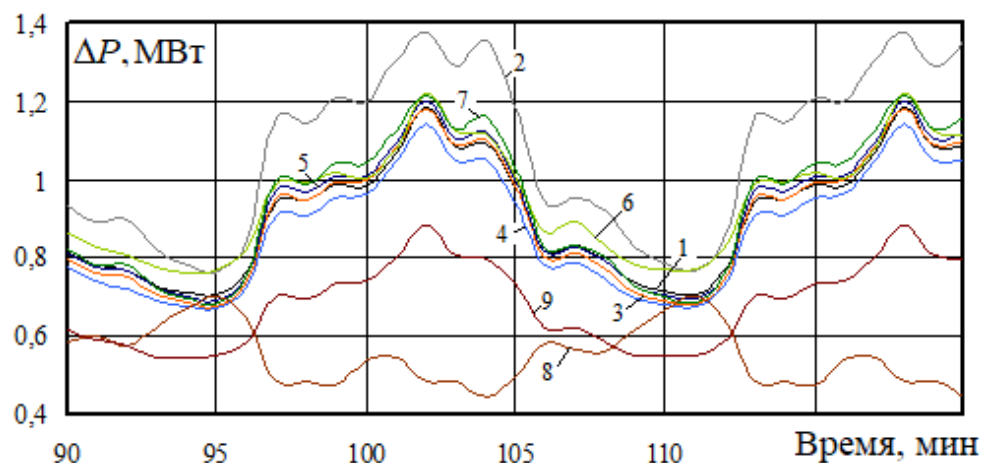


Рис 10. Потери мощности в линии электропередачи 1 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 10. Power loss in power line (digital denominations correspond to fig. 7)

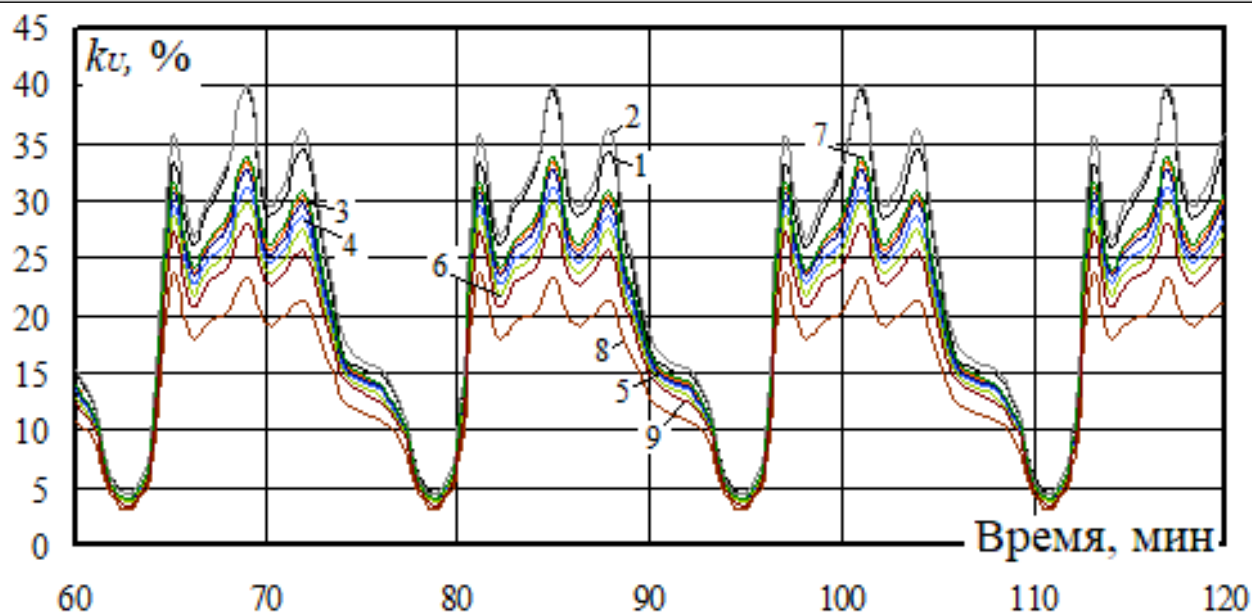


Рис. 11. Суммарные коэффициенты гармоник на вводе 27,5 кВ тяговой подстанции №4

Fig. 11. Total harmonic coefficients in the 27,5 kV input of traction substation no 4

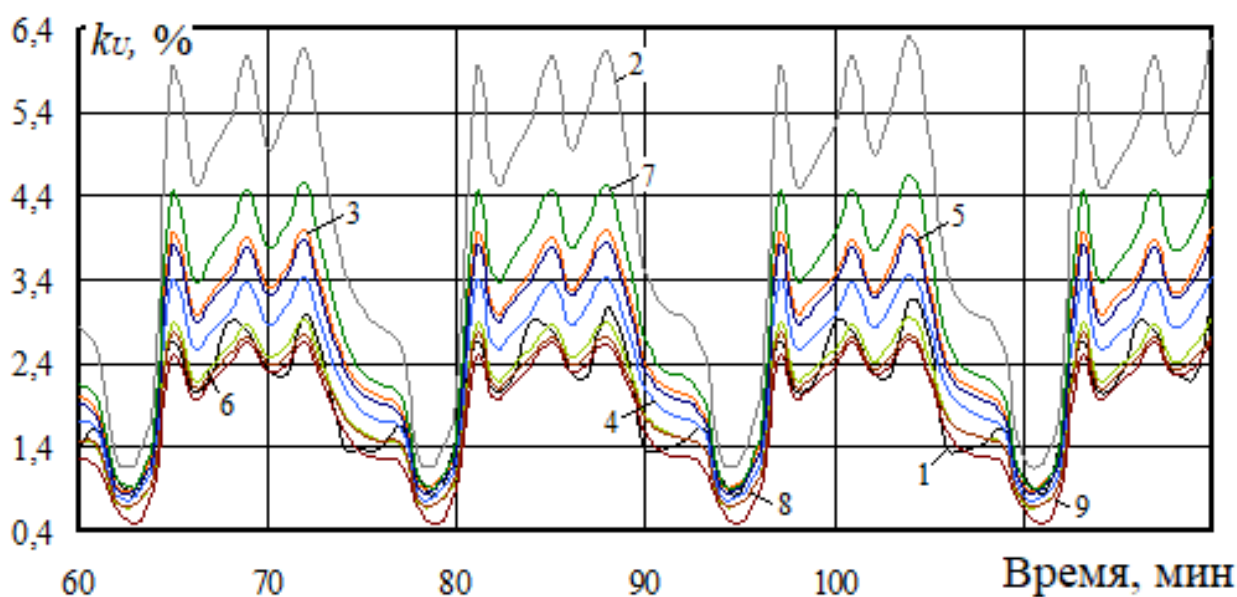


Рис. 12. Суммарные коэффициенты гармоник на шинах 220 кВ тяговой подстанции №4, фаза С  
(цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 12. Total harmonic coefficients in the 220 kV busbars of traction substation no 4, phase C  
(digital denominations correspond to fig.7)

На рис. 7 представлена характеристика динамики изменений напряжений на токоприемнике электровоза первого поезда. На рис. 8 показаны аналогичные графики для коэффициентов несимметрии по обратной последовательности, которые вычислялись на шинах 220 кВ ТП №4. Графики, отвечающие динамике изменений потери мощности в

тяговой сети второй межподстанционной зоны, представлены на рис. 9. Аналогичные зависимости для потерь мощности в ЛЭП 1 приведены на рис. 10. На рис. 11 и 12 показаны графики, соответствующие гармоническим искажениям в питающей и тяговых сетях.

Сводные данные результатов моделирования приведены на рис. 13–18.

Сводные данные по максимальным значениям показателей  
Summary data on maximum values of indicators

Конструкция линии электропередачи Power line design	Показатель					
	Минимальное напряжение на токоприемнике, кВ Minimal voltage in the current collector, kV	Коэффициент несимметрии $k_{2U}$ на шинах 220 кВ ТП 4, % Unbalance factors $k_{2u}$ in 220 kV busbars of TS4, %	Потери мощности в ТС МПЗ 2, кВт Power loss in TN of substation zone-2, kW	Потери в ЛЭП 1, МВт Loss in PL1, mWt	Коэффициент гармоник на шинах 220 кВ ТП 4, фаза С, % Harmonic coefficient in 220 kV busbars of TS 4, phase C, %	Коэффициент гармоник на вводе 27,5 кВ ТП 4, % Harmonic coefficient at the 27,5 kV input of TS4, %
Типовая с проводами АС–600 Standard with AC-600 wires	16,73	4,86	1 015	1,18	3,17	39,74
С вертикальным расположением проводов With vertically arranged wires	16,93	3,43	906	1,37	6,31	40,14
Коаксиальная двухсегментная Coaxial two-segment	18,24	2,1	872	1,18	4,05	33,19
Коаксиальная четырехсегментная Coaxial four-segment	18,72	1,6	857	1,14	3,48	31,13
Треугольная Triangular	18,41	1,64	872	1,2	3,92	23,19
Коаксиальная двойная Coaxial double	19,05	1,55	880	1,22	2,96	29,8
Параболическая Parabolic	18,21	2,08	871	1,22	4,64	33,8
Трехсегментная Three-segment	21,98	1,02	753	0,81	2,75	23,19
Концентрическая Concentric	19,76	1,37	832	0,88	2,68	27,87

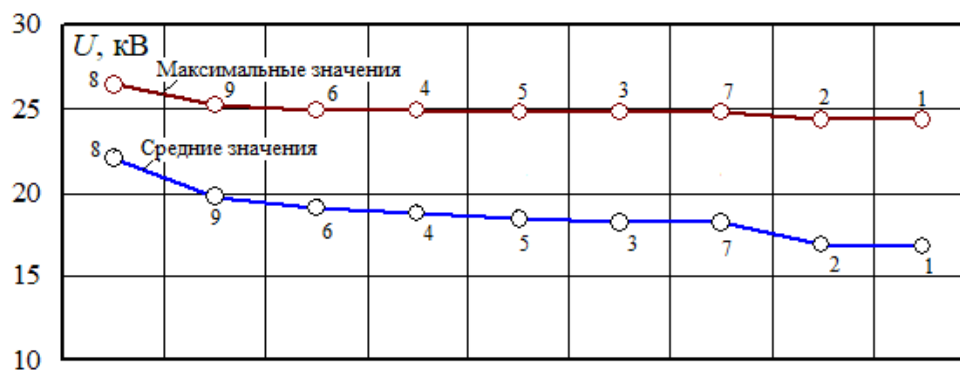


Рис. 13. Напряжение на токоприемнике электровоза первого поезда (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)  
Fig. 13. Voltage on the current collector of the first train's locomotive (digital denominations correspond to fig.7)

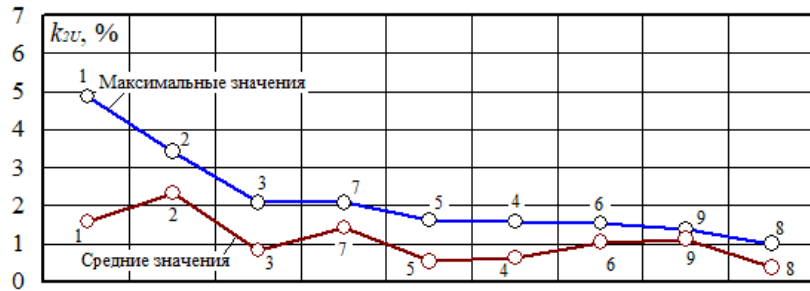


Рис. 14. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ тяговой подстанции №4 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 14. Unbalance factors by reverse sequence on the 220 kV busbars of traction substation no 4 (digital denominations correspond to fig.7)

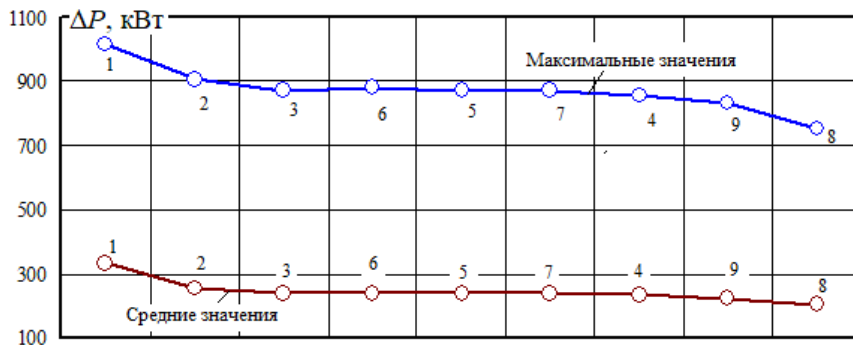


Рис. 15. Потери мощности в тяговой сети МПЗ-2 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 15. Power loss in traction network of substation zone-2 (digital denominations correspond to fig.7)



Рис. 16. Потери мощности в линии электропередачи 1 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 16. Power loss in power line 1 (digital denominations correspond to fig.7)

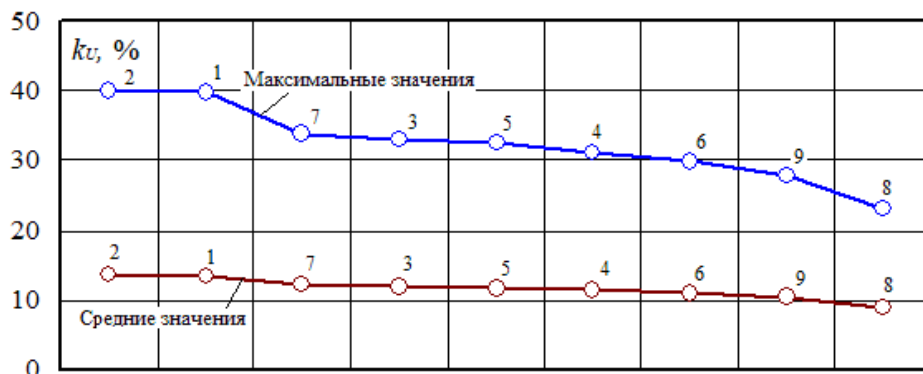


Рис. 17. Суммарные коэффициенты гармоник на вводе 27,5 кВ тяговой подстанции №4 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 17. Summary harmonic coefficients at the 27,5 kV input of traction substation no 4 (digital denominations correspond to fig.7)



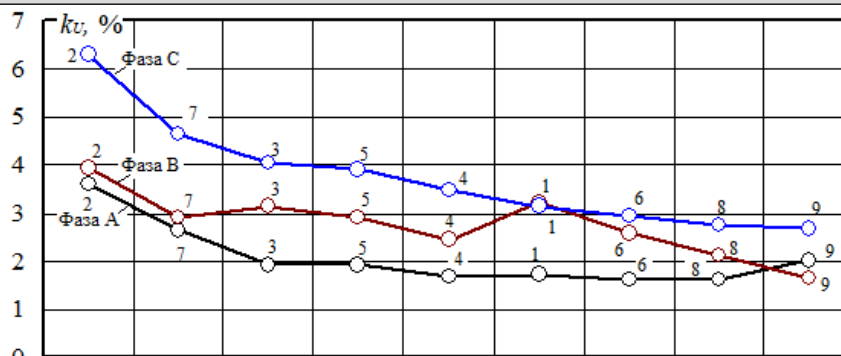


Рис. 18. Максимальные значения суммарных коэффициентов гармоник на шинах 220 кВ тяговой подстанции №4 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 18. Maximum values of summary harmonic coefficients in 220 kV busbars of substation no 4 (digital denominations correspond to fig. 7)

Использование в системе внешнего электроснабжения железной дороги компактных ЛЭП (см. рис. 4) вместо типовых воздушных линий (см. рис. 1) позволяет получить положительные результаты:

1. Напряжения на токоприемниках ЭПС повышаются и стабилизируются (см. табл., рис. 6); в расчетных примерах при типовой питающей ЛЭП напряжение на токоприемнике первого поезда снижается ниже допустимого предела, а при использовании КВЛ трехsegmentной конструкции увеличивается до 22 кВ.

2. Уменьшаются потери в тяговой сети; максимальное снижение имеет место при использовании КВЛ с трехsegmentной конструкцией (см. табл. 1, рис. 8).

3. Улучшается качество электроэнергии;

уменьшаются коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ ТП.

4. Снижаются коэффициенты гармоник на границах раздела с сетями ЭЭС.

### Заключение

Разработана технология цифрового моделирования несимметричных и несинусоидальных режимов систем электроснабжения железных дорог, внешняя сеть которых выполнена компактными ЛЭП различного конструктивного исполнения. По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что компактная ЛЭП с трехsegmentным расположением проводов является одним из лучших вариантов по показателям качества электроэнергии и энергетической эффективности.

### Список литературы

1. Александров Г.Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи. СПб. : ЦПКЭ, 2006. 139 с.
2. Зарудский Г.К., Самалюк Ю.С. О режимных особенностях компактных воздушных линий электропередачи напряжением 220 кВ // Электричество. 2013. № 5. С. 8–13.
3. Лавров Ю.А., Войтович Р.А., Петрова Н.Ф. Особенности создания компактных воздушных линий электропередачи высокого напряжения // Наука в России: перспективные исследования и разработки : материалы I Всерос. конф. Новосибирск : Центр развития научного сотрудничества, 2017. С. 152–159.
4. Применение компактных линий, как одно из средств повышения пропускной способности / В.В. Плотников, Н.Е. Василенко, И.С. Протасенко и др. // Потенциал современной науки. 2016. № 4 (21). С. 37–43.
5. Родионова И.Н. Компактные воздушные линии: надежность, экономичность, качество // Будущее науки. 2017. Т. 4. С. 257–261.
6. Селиверстов Г.И., Комар А.В., Петренко В.Н. Конструкции и параметры компактных одноцепных линий электропередачи с концентрическим расположением фаз // Энергетика. 2012. № 6. С. 41–45.
7. Степанов В.М., Карницкий В.Ю. Компактные линии электропередачи // Изв. Тул. гос. ун-та. Сер. Технические науки. 2010. № 3-5. С. 49–51.
8. Федин В.Т. Инновационные технические решения в системах передачи электроэнергии. Минск : БНТУ, 2012. 222 с.
9. Эффективность передачи электрической энергии при применении компактных управляемых ВЛ / Ю.Г. Шакарян, Л.В. Тимашова, С.Н. Карева и др. // Энергия единой сети. 2014. № 3 (14). С. 4–15.
10. Эффективность компактных управляемых высоковольтных линий электропередачи / В.М. Постолатий, Е.В. Быкова, В.М. Суслев и др. // Проблемы региональной энергетики. 2015. № 3 (29). С. 1–17.
11. Experimental investigation on the minimum approach distance for live working on 1000 kV UHV compact transmission line / Bin Xiao, Tian Wu, Ting Liu Kai Liu et al. // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). 2016. DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800914.

12. Research of Grading Ring for High Altitude 500 kV Compact Transmission Line / Cao Jing, Quan Shanshan, Liang Jinxiang et al. // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE) // IEEE. 2018. DOI: 10.1109/ICHVE.2018.8641899.
13. Khayam U., Prasetyo R., Hidayat S. Electric field analysis of 150 kV compact transmission line. International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS) // IEEE. 2017. DOI: 10.1109/ICHVEPS.2017.8225883.
14. Dahab A.A., Amoura F.K., Abu-Elhaija W.S. Comparison of magnetic-field distribution of noncompact and compact parallel transmission-line configurations. IEEE Transactions on Power Delivery // IEEE. 2005. Vol. 20. Issue 3. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.848720.
15. Вариводов В.Н. Компактные линии электропередачи // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2006. № 2. С. 2–6.
16. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2005. 273 с.
17. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Тхао Ван Лэ. Комплексное моделирование мультифазных, многоцепных и компактных линий электропередачи. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2020. 296 с.
18. Крюков А.В., Лэ Ван Тхао. Электромагнитные поля на трассах многоцепных линий электропередачи // Оперативное управление в электроэнергетике. 2019. № 5. С. 14–20.

### References

1. Alexandrov G.N. Rezhimy raboty vozdushnykh linii elektroperedachi [Modes of operation of overhead power lines]. Saint Petersburg: TSPKE Publ., 2006. 139 p.
2. Zarudskii G. K., Samalyuk Yu.S. O rezhimnykh osobennostyakh kompaktnykh vozdushnykh linii elektroperedachi napryazheniem 220 kV [On the regime features of compact overhead power lines with a voltage of 220 kV]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2013, no. 5, pp. 8-13.
3. Lavrov Yu.A., Voitovich R.A., Petrova N.F. Osobennosti sozdaniya kompaktnykh vozdushnykh linii elektroperedachi vysokogo napryazheniya [Features of the creation of high-voltage compact overhead power lines]. *Materialy I Vserossiiskoi konferentsii «Nauka v Rossii: perspektivnye issledovaniya i razrabotki»* [Proceedings of the I All-Russian Conference «Science in Russia: advanced research and development»]. Novosibirsk, 2017, pp. 152 – 159.
4. Plotnikov V.V., Vasilenko N.E., Protasenko I.S., Zuev M.M., Zueva T.S., Zakutskii V.I., Glushkin S.V., Ermolov N.S. Primenenie kompaktnykh linii, kak odno iz sredstv povysheniya propusknnoi sposobnosti [The use of compact lines as one of the means of increasing the throughput]. *Potentsial sovremennoi nauki* [Potential of modern science], 2016, no. 4(21), pp. 37 – 43.
5. Rodionova I.N. Kompaktnye vozdushnye linii: nadezhnost', ekonomichnost', kachestvo [Compact overhead lines: reliability, efficiency, quality]. *Budushchee nauki* [Future of Science], 2017, vol. 4, pp. 257 – 261.
6. Seliverstov G.I., Komar A.V., Petrenko V.N. Konstruktsii i parametry kompaktnykh odnotsepykh linii elektroperedachi s konsentricheskim raspolozheniem faz [Constructions and parameters of compact single-circuit power lines with concentric phase arrangement]. *Energetika* [Energy], 2012, no. 6, pp. 41-45.
7. Stepanov V.M., Karnitskii V.Yu. Kompaktnye linii elektroperedachi [Compact power lines]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Bulletins of the Tula State University. Ser. Technical science], 2010, no. 3–5, pp. 49-51.
8. Fedin V.T. Innovatsionnye tekhnicheskie resheniya v sistemakh peredachi elektroenergii [Innovative technical solutions in power transmission systems]. Minsk: BNTU Publ., 2012. 222 p.
9. Shakaryan Yu.G., Timashova L.V., Kareva S.N., Postolatii V.M. Effektivnost' peredachi elektricheskoi energii pri primenenii kompaktnykh upravlyaemykh VL [Efficiency of electrical energy transmission when using compact controlled overhead lines]. *Energiya edinoi seti* [Unified Grid Energy], 2014, no. 3(14), pp. 4 – 15.
10. Postolatii V.M., Bykova E.V., Suslov V.M., Shakaryan Yu.G., Timashova L.V., Kareva S.N. Effektivnost' kompaktnykh upravlyaemykh vysokovol'tnykh linii elektroperedachi [Efficiency of compact controlled high-voltage power transmission lines]. *Problemy regional'noi energetiki* [Problems of regional energy], 2015, no. 3 (29), pp. 1 – 17.
11. Experimental investigation on the minimum approach distance for live working on 1000 kV UHV compact transmission line / Bin Xiao, Tian Wu, Ting Liu Kai Liu et al. // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). 2016. DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800914.
12. Research of Grading Ring for High Altitude 500 kV Compact Transmission Line / Cao Jing, Quan Shanshan, Liang Jinxiang et al. // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE) // IEEE. 2018. DOI: 10.1109/ICHVE.2018.8641899.
13. Khayam U., Prasetyo R., Hidayat S. Electric field analysis of 150 kV compact transmission line. International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS) // IEEE. 2017. DOI: 10.1109/ICHVEPS.2017.8225883.
14. Dahab A.A., Amoura F.K., Abu-Elhaija W.S. Comparison of magnetic-field distribution of noncompact and compact parallel transmission-line configurations. IEEE Transactions on Power Delivery // IEEE. 2005. Vol. 20. Issue 3. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.848720.
15. Varivodov V.N. Kompaktnye linii elektroperedachi [Compact Power Lines]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'* [Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry], 2006, no. 2, pp. 2 – 6.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnoesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complexly asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: IGU Publ., 2005, 273 p.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Thao Wang Le. Kompleksnoe modelirovanie mul'tifaznykh, mnogotsepykh i kompak-

tnykh linii elektropredachi [Comprehensive modeling of multiphase, multi-circuit and compact power lines]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2020. 296 p.

18. Kryukov A.V., Le Van Tkhaio. Elektromagnitnye polya na trassakh mnogotsepynykh linii elektropredachi [Electromagnetic fields on the routes of multi-circuit transmission lines]. *Operativnoe upravlenie v elektroenergetike* [Operational management in the electric power industry], 2019, no. 5, pp. 14 – 20.

### Информация об авторах

**Воронина Екатерина Викторовна**, кафедра электроэнергетики транспорта Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: eka7erina.voronina@yandex.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.

**Степанов Андрей Дмитриевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: irkutsk-energo@yandex.ru.

**Фесак Илья Анатольевич**, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: fesakilya@yandex.ru.

### Information about the authors

**Ekaterina V. Voronina**, Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: eka7erina.voronina@yandex.ru.

**Andrei V. Kryukov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University Irkutsk; e-mail: and\_kryukov@mail.ru.

**Andrei D. Stepanov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: irkutsk-energo@yandex.ru.

**Ilya A. Fesak**, Ph.D. Student of the Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: fesakilya@yandex.ru.

## **Этапы формирования маркетинговой стратегии управления терминально-складским комплексом ОАО «Российские железные дороги» с целью достижения максимальных результатов продвижения транспортных услуг и привлечения клиентов**

Н.В. Власова, В.А. Оленцевич✉

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

✉olencevich\_va@mail.ru

### **Резюме**

Современные концепции транспортно-логистических систем России, формирующихся и трансформирующихся в сложных политических и экономических условиях, с целью их успешного развития и эффективного функционирования должны включать в себя как инфраструктурную, так и координационную составляющие, что позволит им интегрироваться в целостную интеллектуальную транспортную систему международного уровня. Сегодня основополагающим сектором транспортно-логистической системы ОАО «Российские железные дороги» является терминально-складской комплекс, поскольку именно он выступает как основной элемент системы, преобразовывающий материальный поток грузов от производителей сырья и материалов до конечного потребителя готовой продукции. В связи с данными факторами решение актуальных задач, возникающих в процессе преобразования транспортно-логистической системы, без наличия научно-обоснованной методологии, учитывающей эффективное развитие терминально-складского комплекса, невозможно. С целью достижения максимальных результатов по продвижению товаров и услуг, утверждению крепких позиций на транспортном рынке необходимо быстро реагировать на изменяющиеся тенденции спроса, а также найти свой оптимальный стиль работы, который будет учитывать цели и возможности Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом филиала ОАО «Российские железные дороги». Предложенная маркетинговая стратегия позволяет наметить основные направления производственно-хозяйственной деятельности и сбыта на текущий и перспективный периоды, структурирует и упорядочивает деятельность, фокусирует внимание на основных сегментах транспортного рынка, синхронизирует производственные и маркетинговые планы. Основные этапы разработки эффективной маркетинговой стратегии представлены в данном научном исследовании.

### **Ключевые слова**

маркетинговая стратегия, терминально-складской комплекс, эффективность продаж, транспортно-логистические услуги, полный комплекс экспедиторских услуг, улучшение качества обслуживания клиентов, матрица приоритетности

### **Для цитирования**

Власова Н.В. Этапы формирования маркетинговой стратегии управления терминально-складским комплексом ОАО «Российские железные дороги» с целью достижения максимальных результатов продвижения транспортных услуг и привлечения клиентов / Н.В. Власова, В.А. Оленцевич // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 163–174. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).163-174.

### **Информация о статье**

Поступила в редакцию: 20.06.2022 г.; поступила после рецензирования: 27.06.2022 г.; принята к публикации: 28.06.2022 г.

## **Stages of forming a marketing strategy for managing the terminal and warehouse complex of JSC «Russian Railways» in order to achieve maximum results in promoting transport services and attracting customers**

N.V. Vlasova, V.A. Olentsevich✉

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉olencevich\_va@mail.ru

### **Abstract**

Modern concepts of Russia's transport and logistics systems shaped and transformed under complex political and economic conditions, in order to successfully develop and effectively function, should include both infrastructural and coordinating components, which would allow them to fit into an integrated intelligent transport system of international level. Today, the terminal and warehouse complex is the fundamental sector of the transport and logistics system of JSC «Russian Railways», since it's «Russian Railways» that acts as the main element of the system transforming the material flow of goods from producers of raw materials and product to the delivery of finished products to the final consumer. Due to these factors, it is impossible to solve urgent

problems arising in the process of transformation of the transport and logistics system without the availability of a scientifically based methodology that takes into account the effective development of the terminal and warehouse complex. In order to achieve maximum results in the promotion of goods and services, to establish strong positions in the transport market, it is necessary to respond quickly to changing demand trends, as well as to find an optimal work style that will take into account the goals and capabilities of the Central Directorate for the Management of the Terminal and Warehouse Complex of the branch of JSC «Russian Railways». The proposed marketing strategy makes it possible to outline the main directions of production and economic activity and sales for the current and prospective periods, structures and organizes activities, focuses on the main segments of the transport market, synchronizes production and marketing plans. The main stages of developing an effective marketing strategy are presented in this scientific study.

### Keywords

marketing strategy, terminal and warehouse complex, sales efficiency, transport and logistics services, full range of forwarding services, improvement of customer service quality, priority matrix

### For citation

Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Etapy formirovaniya marketingovoi strategii upravleniya terminal'no-skladskim kompleksom OAO «Rossiiskie zheleznye dorogi» s tsel'yu dostizheniya maksimal'nykh rezul'tatov prodvizheniya transportnykh uslug i privlecheniya klientov [Stages of forming a marketing strategy for managing the terminal and warehouse complex of JSC «Russian Railways» in order to achieve maximum results in promoting transport services and attracting customers]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 163–174. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).163-174.

### Article Info

Received: June 20, 2022; revised: June 27, 2022; accepted: June 28, 2022.

### Введение

В условиях непрерывного развития экономики страны с наращиванием объемов промышленности возникает потребность в перемещении грузов. Железная дорога в этом плане играет большую роль, ее доля составляет 47 % от всего российского грузооборота. Анализ транспортного рынка России показывает, что среди основных качественных требований к перевозочному процессу, предъявляемых грузовладельцами, приоритетное значение имеют:

- увеличение скорости перевозки на всем маршруте следования;
- соблюдение нормативного (договорного) срока доставки грузов;
- обеспечение ритмичности перевозок грузов во взаимосвязи с технологическими процессами работы предприятий;
- предоставление точной информации о местонахождении груза;
- предоставление дополнительных транспортно-экспедиционных услуг (экспедирование, таможенные операции, фасовка, затаривание, доставка «от двери до двери» и пр.).

Тенденции российской экономики последних лет связаны с ростом экспорта в страны Азиатско-Тихоокеанского региона, следствием чего является рост железнодорожных перевозок в восточном направлении по ключевым магистралям Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской и Дальневосточной

железных дорог, которые вместе составляют Восточный полигон. Кардинальная трансформация системы планирования перевозок грузов в условиях развития рыночных отношений потребовала гибкого реагирования на изменение направления грузопотоков и их колебания, а конкуренция со стороны других видов транспорта вызывает необходимость поиска новых технологических решений при организации работы и управлении терминально-складским комплексом ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») [1, 2].

### Основные этапы формирования маркетинговой стратегии Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом

С целью достижения максимальных результатов по продвижению услуг и утверждению крепких позиций на транспортном рынке компаниям сегодня необходимо быстро реагировать на изменяющиеся тенденции спроса, а также найти свой оптимальный стиль работы, который будет учитывать цели и возможности Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом филиала ОАО «РЖД» (далее – ЦМ). Маркетинговая стратегия в данной области – это формирование целей и задач, которые ставит перед собой ЦМ, определение эффективных способов и средств их достижения [3, 4].

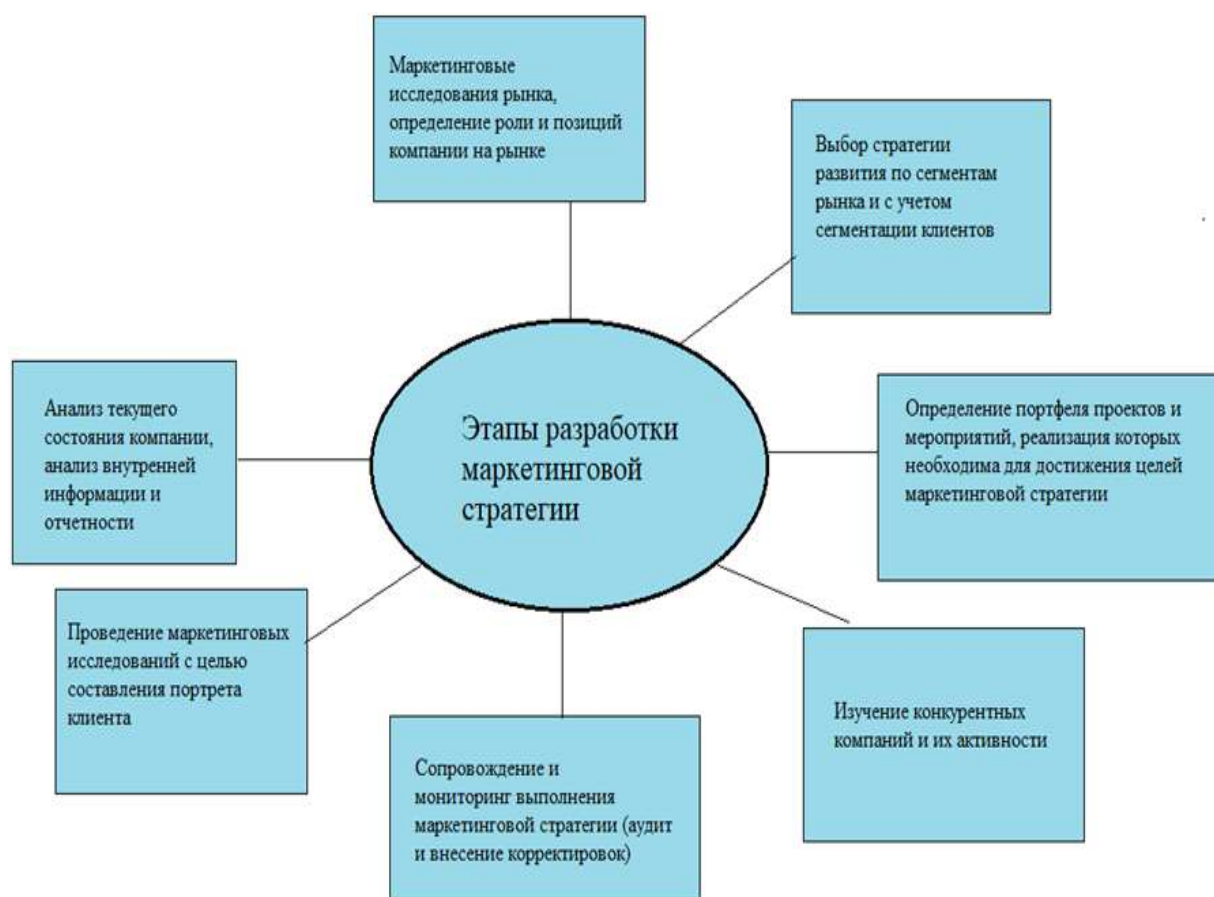
Маркетинговая стратегия определяет основные направления производственно-хозяйственной деятельности и сбыта на текущих и перспективный периоды, структурирует и упорядочивает деятельность, фокусирует внимание на основных сегментах транспортного рынка, синхронизирует производственные и маркетинговые планы, формирует поведение руководителей и работников предприятий и структурных подразделений ЦМ, позволяет эффективно распределять материально-технические ресурсы. Основные этапы разработки эффективной маркетинговой стратегии, представлены на рис. 1.

Применение эффективной маркетинговой стратегии позволяет получить следующие результаты:

– укрепление рыночных позиций;

– рост доли рынка и увеличение уровня продаж;  
 – завоевание новых сегментов рынка, рост числа лояльных потребителей;  
 – выход на новые рынки и расширение географических границ продаж;  
 – успешное выведение на рынок новых товаров и услуг.

Маркетинговые исследования рынка транспортных услуг – необходимая часть маркетинговой стратегии. Это делается для того, чтобы сократить риски и иметь представления о реальных факторах, условиях и опасностях рынка. Транспортный рынок сегодня – явление неопределенное, а при помощи маркетинговых исследований возможно свести потери к минимуму. Кроме того, исследования помогают правильно корректировать стратегию и планы по



**Рис. 1.** Этапы разработки эффективной маркетинговой стратегии предприятий и структурных подразделений ОАО «Российские железные дороги»

**Fig. 1.** Stages of developing an effective marketing strategy for enterprises and structural units of JSC «Russian railways»

достижению стратегических целей ОАО «РЖД». Поэтому основные принципы стратегии должны применяться в работе всеми сотрудниками отрасли [5].

Принимаемые руководителями ОАО «РЖД» и ее структурных подразделений решения не должны противоречить основным направлениям стратегии, а быть направлены на ее эффективную реализацию и достижение стратегических целей. Стратегия может быть пересмотрена при необходимости с учетом результата выполнения мероприятий, принимаемых руководством ОАО «РЖД» решений, изменений на рынке транспортно-логистических услуг и прочих обстоятельств, которые не могли быть предусмотрены до утверждения стратегии.

### Определение приоритетных направлений развития Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом

С целью укрепления рыночных позиций ЦМ необходимо определить приоритетные направления развития. Возможные варианты увеличения рыночной доли транспортных и логистических услуг включают:

- наращивание доли в местах необщего и общего пользования в рамках существующей номенклатуры грузов и за счет ее расширения;
- оказание полного комплекса экспедиторских услуг, в том числе при отправлении грузов на экспорт.

Примерами способов увеличения доли в местах общего пользования в рамках суще-

ствующей номенклатуры грузов могут служить следующие мероприятия:

- территориальное расширение обслуживания, в том числе открытие новых грузовых дворов с постоянными работниками или при условии обслуживания грузовых дворов мобильными бригадами;
- увеличение мощностей существующих грузовых дворов за счет модернизации оборудования;
- повышение эффективности продаж;
- расширение ассортимента услуг;
- изменение ценовой политики и др.

С целью наращивания доли в местах общего пользования за счет расширения номенклатуры грузов может потребоваться развитие новых компетенций, совместный поиск оптимальных решений с потенциальными клиентами. Следует сделать упор на грузах с высокой долей тяготения к переработке в местах общего пользования [2, 6–8].

Нарастить долю в местах необщего пользования позволит повышение эффективности продаж, улучшение качества обслуживания клиентов и другие инициативы.

Соотношение сложности реализации и привлекательности направлений развития ЦМ на рынке грузопереработки представлено в виде матрицы (рис. 2).

### Результаты SWOT-анализа

Проведение SWOT-анализа необходимо на подготовительном этапе внедрения маркетинговой стратегии для оценки целесообразности ее реализации, чтобы минимизировать воз-

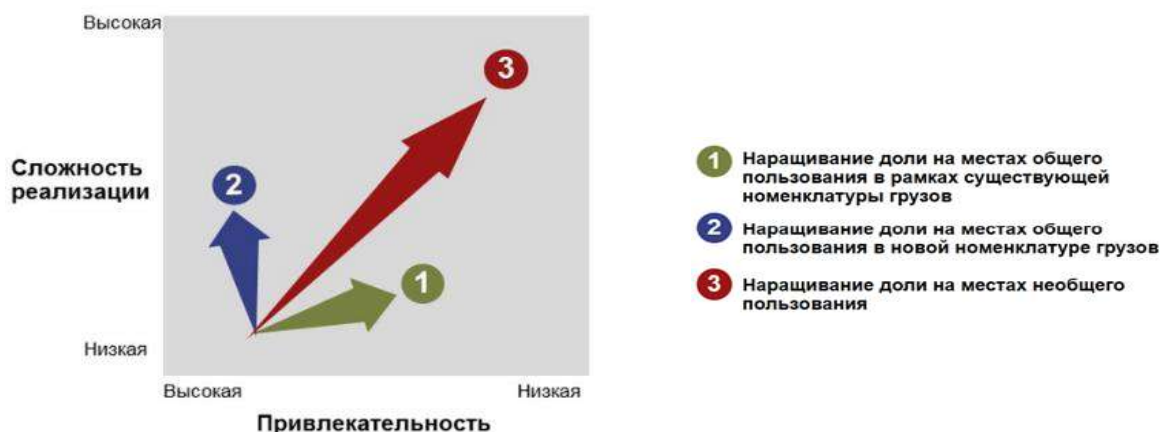


Рис. 2. Матрица приоритетности направлений развития Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом

Fig. 2. Priority matrix for the development directions of Central Directorate for the Management of the Terminal and Warehouse Complex

можные будущие издержки [9, 10].

Сильные стороны деятельности ЦМ:

- обширная сеть и география распространения терминалов ЦМ;
- наличие современных и / или специальных погрузочно-выгрузочных механизмов для осуществления работ практически с любыми видами грузов (кроме наливных);

- нет платы за подачу / уборку вагонов;

- стабильность и узнаваемость бренда ОАО «РЖД».

- наличие услуг мобильных бригад, т. е. возможности организации работы не только на грузовых дворах ЦМ, но и на территории клиентов.

Слабые стороны деятельности ЦМ:

- ориентация на инертные грузы;

- изношенная и морально устаревшая инфраструктура и активы;

- высокая себестоимость предоставляемых услуг;

- низкий уровень цифровизации;

- отсутствие возможности выступать грузоотправителем;

- сложные «стыковочные» процессы внутри ОАО «РЖД»;

- отсутствие инвестиционного ресурса;

- низкий уровень квалификации кадров.

Возможности ЦМ:

- присутствие объектов складского комплекса ОАО «РЖД» в регионах России с растущим спросом;

- организация сквозных сервисов, в том числе совместных с дочерними и зависимыми обществами (ДЗО);

- оказание услуг в приграничных зонах РФ и складах временного хранения;

- возможность рассмотрения предложений на государственном уровне.

Угрозы деятельности ЦМ:

- повышение требований клиентов по безопасности, качеству услуг и к самим объектам (конфигурация, топология, оснащение);

- закрытие грузовых дворов, вынос грузовой работы за пределы городов;

- быстрорастущий конкурентный рынок складской логистики.

Из проведенного SWOT-анализа следует вывод, что имеющийся ресурс складского комплекса ОАО «РЖД» в регионах страны позволяет сформировать на транспортном рынке специализированную нишу, но при этом необходимы инвестиции для модернизации активов под требования рынка. Кроме того, для сохранения конкурентоспособности на быстрорастущем логистическом рынке необходима четко сформулированная маркетинговая стратегия.

### Роль Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом на рынке транспортно-логистических услуг

Рынок транспортной обработки грузов включает в себя «первую и последнюю мили», обработку (погрузо-разгрузочные работы и



Рис. 3. Сегменты рынка перевозки, обработки и складирования грузов, перевозимых Железнодорожным транспортом

Fig. 3. Market segments of transportation, processing and warehousing of freight transported by railway



сортировку) и хранение (рис. 3).

В настоящее время ЦМ обеспечивает полноценное предоставление услуг только по погрузке / выгрузке грузов. Услуга «первая миля» в данный момент частично предоставляется при перевозке контейнеров, при этом для инертных, тяжеловесных, тарно-штучных грузов данная услуга пользуется спросом, но не оказывается подразделениями ЦМ. Услуга «последняя миля» реализуется чуть более активно, в частности, для инертных и тяжеловесных грузов. Услуга складирования (хранения) грузов в полной мере не реализуется [2, 6, 11–13].

### Стратегические цели и иерархия целей Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом

Функциональные цели необходимо декомпозировать на задачи. Идеально, если ключевых задач будет 20–25, таким образом, сформируется стратегическая карта ЦМ. Для каждого элемента стратегической карты необходимо выбрать показатели, которые можно будет отобразить в числовом эквиваленте. Далее необходимо установить целевые значения для каждого показателя с разбивкой по кварталам. При выборе целевых значений следует придерживаться таких правил, как:

- цели не должны конфликтовать и противоречить друг другу;
- цели должны быть достижимыми и однозначными;
- достижение целей должно требовать

напряжения.

Также важно учитывать, что легкодостижимые или невыполнимые цели не мотивируют сотрудников на работу, а значит не будут способствовать реализации стратегических целей.

Затем необходимо обеспечить разработку комплекса стратегических мероприятий и тактическое планирование. Для достижения функциональных целей подразделения ЦМ, ответственные за реализацию стратегии по направлениям, указанным ранее, разрабатывают планы мероприятий, дорожные карты и другие нормативные документы, которые позволят достичь заданных функциональных параметров и стратегической цели [2, 8, 14–16].

### Сегментация грузов и клиентов

Основные номенклатуры грузов, перерабатываемые ЦМ: инертные грузы, контейнеры, тяжеловесные грузы, тарно-штучные грузы и пр. На сегодняшний день основной объем переработки обеспечивается за счет насыпных грузов, доходность и маржинальность которых не имеет значительного веса. Анализ влияния объемов грузопереработки на доходы и прибыль в разрезе номенклатуры грузов приведен на рис. 4.

Для реализации настоящей маркетинговой стратегии с учетом готовности инфраструктуры и наработанных компетенций в качестве основного приоритетного направления определены тяжеловесные грузы. При этом, принимая во внимание доходность в терми-



Рис. 4. Анализ влияния объемов грузопереработки на доходы и прибыль в разрезе номенклатуры грузов  
Fig. 4. Analyses of cargo-handling volumes' effect on income and profit from the product range point of view

нальных услугах и перевозках тарно-штучных грузов, с учетом дефицита необходимой инфраструктуры (соответствующей классам складов А, В и С) и неготовности предоставления качественного сервиса в ходе реализации стратегии по итогам 2022 г. должна быть обеспечена возможность и техническая готовность переработки тарно-штучных грузов силами ЦМ.

Кроме того, в период 2022–2023 гг. стратегическим направлением является работа по привлечению и организации переработки новых видов грузов или грузов, переработка которых не носит системного характера. Так, для проектной работы определены – зерновые, мелкодисперсные, опасные и наливные (перевозимые в специализированных контейнерах) грузы [2, 17–19].

При этом в разных видах грузов необходимо придерживаться различной стратегии продаж и поведения на рынке.

Для приоритетного тяжеловесного груза необходимо придерживаться дифференцированной стратегии создания уникальной услуги или совершенствования существующей услуги для повышения ее ценности с целью продажи по более высокой цене. Ключевыми моментами реализации стратегии являются: качество обслуживания клиентов, соответствующее их ожиданиям, качество производственных процессов, оказание комплексной услуги, обеспечение мобильности, поддержка клиентов и др.

Для контейнерных и инертных грузов предусматривается стратегия, направленная на удержание доли ЦМ на рынке за счет роста объемов работы на действующих терминалах и в местах общего пользования. При этом, принимая во внимание логистику перевозок грузов в контейнерах, необходимо предусмотреть возможность переработки контейнерных грузов силами ЦМ в Московском регионе.

Вместе с тем для инертных грузов, учитывая наличие технических средств и инфраструктуры, выбранная стратегия используется в краткосрочном периоде – до 2022 г. Учитывая низкую рентабельность инертных грузов для ЦМ, в период реализации стратегии 2021–2022 гг. целесообразно постепенное сокращение инвестирования средств в техническое оснащение и инфраструктуру для инертных грузов. При этом переработка таких грузов за счет их объемных параметров позволяет сократить себестоимость посредством перераспределения накладных рас-

ходов, в связи, с чем необходима для обеспечения деятельности ЦМ в краткосрочной перспективе. При достижении значительных объемов от переработки других видов грузов, необходимо скорректировать маркетинговую стратегию, предусмотрев снижение доли инертных грузов в портфеле услуг ЦМ.

В целях обеспечения готовности ЦМ нужно создать соответствующий требованиям рынка уровень сервиса по переработке тарно-штучных грузов. Для достижения цели определена стратегия следования за лидером рынка. Необходимо на основе детального мониторинга сложившихся рыночных условий и предпочтений клиентов подготовить инфраструктуру и персонал ЦМ для формирования и продажи требуемой услуги.

### **Стратегические приоритеты с учетом сегментации клиентов**

При создании маркетинговой стратегии ЦМ было проведено сегментирование клиентов и выделены три основных клиентских класса. Стратегия в отношении различных групп клиентов необходима для формирования определенности в поведении с клиентом и при принятии решений руководителями всех уровней. Аналогичным образом решаются иные вопросы взаимодействия с клиентами.

Крупный клиент – это клиент, доход от которого составляет не менее 30 млн. руб. в год или работа с которым имеет сетевой масштаб, включающий в себя предоставление услуг на нескольких терминалах ЦМ на полигонах различных железных дорог.

Локальный клиент – клиент с доходом от 5 до 30 млн. руб. в год, при этом работа осуществляется на полигоне одной железной дороги.

Разовый (мелкий) клиент – это клиент, работа с которым происходит эпизодически, преимущественно разово.

Для каждого из указанных выше клиентских типов стратегией зафиксированы соответствующие аспекты.

Крупный клиент:

1. Стратегия – удержание любой ценой (всегда индивидуальный подход).

2. Условия договора – составление договора преимущественно на условиях клиента.

3. Ценовые условия – преимущественно принятие условий клиента после разумного торга.

4. Дебиторская задолженность – при возникновении дебиторской задолженности – работа с клиентом продолжается, проводятся мероприятия по погашению задолженности.

5. Техническое оснащение – при возникновении особых требований клиента по техническому оснащению возможности грузового двора не учитываются. Деятельность организуется исходя из возможностей железнодорожных станций.

6. Режим работы – при составлении режима работы грузового двора в приоритет ставятся потребности клиента.

Локальный клиент:

1. Стратегия – ориентация на предпочтения клиентов при организации текущей деятельности.

2. Условия договора – согласование условий договора происходит в установленном порядке.

3. Ценовые условия – согласование происходит в установленном порядке с учетом экономической эффективности для ЦМ.

4. Дебиторская задолженность – при возникновении дебиторской задолженности – работа с клиентом продолжается, задолженность взыскивается в установленном порядке.

5. Техническое оснащение – при возникновении особых требований клиента по техническому оснащению работа организуется при условии экономической эффективности для ЦМ.

6. Режим работы – при составлении режима работы грузового двора в приоритет ставится экономическая эффективность для ЦМ.

Разовый клиент:

1. Стратегия – предлагаются только типовые решения.

2. Условия договора – согласование происходит согласно типовому договору ЦМ.

3. Ценовые условия – соответствуют прейскуранту ЦМ.

4. Дебиторская задолженность – при возникновении дебиторской задолженности работа с клиентом прекращается.

5. Техническое оснащение – работа организуется в соответствии с имеющимися возможностями.

6. Режим работы – услуги оказываются в соответствии со стандартным графиком работы грузового двора.

### **Основные стратегические направления для реализации функциональными подразделениями Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом**

Для реализации настоящей маркетинговой стратегии и достижения стратегической цели необходимо руководствоваться приоритетами при продаже и организации исполнения терминально-складских услуг:

1. Прямые продажи услуг. Стратегическим приоритетом является развитие прямых каналов продажи услуг ЦМ, в том числе электронных. При этом использование возможности продажи услуг через ДЗО ОАО «РЖД», прочих посредников в ЦМ не исключается.

2. Гибкая ценовая политика. Индивидуальные ценовые условия для клиентов, скидки на услуги и маркетинговые акции – по решению ценовых комиссий ЦМ и ее структурных подразделений. При рассмотрении запросов на ценовых комиссиях по договорным сборам решения также должны приниматься с учетом стратегических приоритетов и сегментации клиентов, т. е., решения об индивидуальных условиях принимаются для крупных и локальных клиентов, для разовых (мелких) клиентов предлагается работа по прейскуранту или может быть принято решение о снижении стоимости в прейскуранте для широкого круга лиц при несоответствии стоимости рыночным условиям. Прейскурант должен анализироваться на предмет «продаваемости» ставок. По результатам анализа в него вносятся изменения.

3. Выполнение работ собственными силами. При продаже услуг клиентам в процессе проведения переговоров приоритетно максимальное удовлетворение потребностей клиента за счет предоставления полного комплекса услуг. Продажа «полносоставной» услуги должна осуществляться в первую очередь. Возможно оказание услуг или части услуг с привлечением соисполнителей по договорам подряда или оказания услуг, в том числе по агентским договорам. Частичное выполнение услуг, а также выполнение части услуги должно предусматриваться только в исключительных случаях, таких как организация работ на территории клиента, наличие у клиента собственного дорогостоящего оборудования при незначительном объеме оказываемых услуг и др. Оказание таких услуг и установление стоимости по ним утверждается

решением ценовой комиссии ЦМ или ее структурных подразделений. Совместные проекты с участием финансовых вложений клиентов в части расходов на организацию выполнения работ и услуг предусматривается в зависимости от сегментации клиентов, предусмотренной настоящей стратегией.

4. Полная ответственность перед клиентом за груз, сроки и качество. Для реализации стратегической цели с учетом установленных приоритетных направлений рынка (тяжеловесные, тарно-штучные и новые виды груза) для фокусирования усилий ЦМ на предоставлении

комплексных экспедиторских услуг необходимо соответствие требованиям клиента об ответственности за переданный для перевозки, хранения и терминальной обработки груз. При проведении переговоров необходимо предлагать оказание услуги в условиях гарантированной сохранности груза, соблюдения сроков выполнения работ, сроков доставки груза и высокого качества сервиса. Для выполнения требований необходимо развитие автоматизации учета груза, внедрение систем идентификации и отслеживания груза в режиме реального времени, а также развитие культуры обслуживания клиентов и

План основных стратегических направлений для реализации функциональными подразделениями Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом

Main strategic directions plan to be implemented by functional units of Central Directorate for the Management of the

Terminal and Warehouse Complex

№ п/п	Направление деятельности Sphere of activity	Разрабатываемые мероприятия Measures under development
1	Дополнительные услуги Additional services	Завоз / вывоз автомобильным транспортом. Delivery/removal by auto vehicle
		Крепление груза на подвижном составе, разработка схем и эскизов, услуги «мастера погрузки». Securing cargo on rolling stock, working out schemes and sketches, «loading master's» services
		Ответственное хранение (адресное хранение). Responsible (address) storage
		Оформление перевозки и иных документов, связанных с перевозкой, заказ вагона. Shipping and other papers registration, car ordering
2	Пакетные предложения Package offers	Разработка пакетов услуг по видам грузов и их актуализация. Developing service packages according to the cargo types and their actualization
		Проведение переговоров с клиентами, заключение договоров. Conducting negotiations with clients, making deals
		Проведение информирования клиентов. Informing the clients
		Анализ результатов применения, доработка, тиражирование. Application results analyses, revision, replication
3	Повышение качества quality improvement	Повышение надежности техники. Increasing mechanisms' reliability
		Совершенствование технологии работы. Improving operation technology
		Разработка и внедрение стандартов оказания услуг. Developing and implementing standards of services
		Автоматизация процессов оказания услуг. Service automation
4	Продвижение Promotion	Активное участие на имиджевых мероприятиях (конференции, форумы) обязательно с докладом (Лицо ЦМ) – образовательная функция – об услугах ЦМ с учетом нового позиционирования. Participation in image events (conferences, forums) report required (CM person) – educational function – about CM services with new positioning considered
		Активный онлайн-медиа PR. Active online-media PR
		Участие в отраслевых выставках. Participation in industry exhibitions
		Создание сайта и мобильного приложения ЦМ. Designing CM's site and mobile app
		Активизация офлайн-рекламной и PR деятельности. Activation of off-line advertising and PR activities
		Развитие корпоративной культуры, ориентированной на клиента. Developing client-oriented corporal culture

бережного отношения к имуществу клиентов. Для минимизации финансовых рисков возникновения имущественной ответственности необходимо рассматривать возможность страхования ответственности перед клиентом как в конкретных проектах, так и путем заключения агентских соглашений.

5. Способ расчетов, ориентированный на предпочтения клиентов. В зависимости от предпочтения клиента или от вида оказываемых услуг расчет может производиться с использованием расчетного счета региональной дирекции или единого лицевого счета. При этом важно стремиться к максимальному охвату расчетов с применением электронного документооборота, но не в ущерб сохранению договорных отношений с клиентом.

6. Совместные проекты с ДЗО. Для достижения стратегических целей необходимо обеспечить максимальное участие ЦМ в проектах, реализуемых ДЗО, включительно вне границ грузовых дворов. При этом важно не только оказывать услуги по запросу ДЗО, но и рассматривать возможность совместного исполнения обязательств перед клиентом в случае невозможности прямого участия в проекте, в том числе по агентской схеме.

7. Продажа услуг в комплексе. В ходе реализации стратегии 2022–2023 гг. ЦМ ставит перед собой задачу по качественному переходу от роли терминального оператора к роли экспедитора. Необходимо обеспечить оказание услуг без непосредственного участия клиента в процессе. Правовой аспект такого обслуживания проработан ранее и определена возможность экспедирования грузов по доверенности клиента. Учитывая имеющийся опыт точечного оказания подобных операций, необходимо сосредоточить усилия на тиражировании и масштабировании комплексных услуг на всей сети железных дорог, в том числе на оказании сквозных сервисов.

В 2022 г. ЦМ приступила к созданию условий для оказания экспедиторских услуг. Организовано утверждение необходимых нор-

мативных документов, тестирование на pilotном полигоне, позволяющее обеспечить на основании доверенности клиента экспедирование в следующем объеме: подача заявки на перевозку формы ГУ-12; заказ вагона (контейнера) у собственника; разработка и утверждение схемы, эскиза; предоставление реквизитов увязки-крепления; терминально-складские услуги; предоставление мастера погрузки; оформление транспортной железнодорожной накладной; доставка грузов от склада продавца на станцию отправления, до склада (цеха) потребителя на станции назначения.

План основных стратегических направлений для реализации функциональными подразделениями ЦМ представлен в таблице.

### Заключение

В соответствии с долгосрочным планом развития ОАО «РЖД» для ЦМ сформирована следующая стратегическая цель – обеспечить по итогам 2022 г. получение доходов от подсобно-вспомогательной деятельности не менее 9,895 млрд руб. (инвестиционный сценарий долгосрочного плана развития до 2025 г. предусматривающий дополнительные инвестиции в инфраструктуру в размере 6,7 млрд руб.). Долгосрочным планом развития предусмотрены целевые показатели по всем направлениям деятельности ЦМ: прибыль, грузопереработка, себестоимость, расходы по видам деятельности, производительность труда и пр.

Для выполнения стратегической цели должны быть сформированы функциональные цели по направлениям деятельности ЦМ: производство, организационная структура и персонал, маркетинг и продажи, экономика, цифровизация, развитие.

Приступив к реализации стратегии, крайне важно сравнивать вектор движения с запланированным, чтобы не отклоняться от нужного курса. Необходимо контролировать и своевременно редактировать перечень установленных задач.

### 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 10.06.2022).
2. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : сайт. URL: <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 07.06.2022).
3. О стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 г. № 877-р. URL: <http://government.ru/docs/all/64817/> (Дата обращения 08.06.2022).

4. Об утверждении Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.09.2018 г. № 2101-р. URL: <http://government.ru/docs/34297/> (Дата обращения 12.06.2022).
5. Шкурина Л.В. Методология формирования конкурентоспособной экономической стратегии железнодорожного транспорта : автореф. ... д-ра экон. наук. М., 2004. 48 с.
6. Файзрахманова Е.В., Оленцевич А.А., Микаилов Р.А. Совершенствование управления логистическими издержками предприятия // Актуальные вопросы современной экономики. 2021. № 1. С. 70–74.
7. Оленцевич В.А., Власова Н.В. Оценка удовлетворенности качеством услуг грузовых железнодорожных перевозок // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2021. № 8. С. 187–188.
8. 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.
9. Formation of new principles and models of operation of structural units of the industry under the conditions of implementation of digital technologies / DA Lysenko, V.A. Olentsevich, N.V. Vlasova et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 1064 (2021). 012025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012025>.
10. Сохранить дорогое // Gudok.ru : сайт. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=890057> (Дата обращения 10.06.2022).
11. Файзрахманова Е.В., Игнатъева Е.И., Оленцевич А.А. Безбарьерная транспортная среда как средство повышения эффективности грузовых перевозок // Повышение управленческого, экономического, социального и инновационно-технического потенциала предприятий, отраслей и народно-хозяйственных комплексов : сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2020. С. 210–213.
12. Нестеров В.Н. Качество обслуживания грузовладельцев и потенциал транспортной компании // Транспорт: наука, техника, управление. 2011. № 6. С. 26–30.
13. Пехтерев Ф.С., Замковой А.А. О формировании научных задач по созданию интегральной евроазиатской транспортной системы в контексте развития международных транспортных коридоров // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». 2018. №1. С. 28–36.
14. Динец Д.А., Меркулов А.С. Применение принципа управления транспортным коридором к организации деятельности Транссибирской магистрали // Транспортное право и безопасность. 2021. №3 (39). С. 49–56.
15. Сханова С.Э., Попова О.В., Горев А.Э. Транспортно-экспедиционное обслуживание. М.: Академия. 2005. 432 с.
16. Об утверждении концепции клиентоориентированности холдинга «РЖД» в области грузовых перевозок : распоряжение ОАО «РЖД» от 07.12.2016 г. № 2487р. Доступ из локал. сети БД АСПИЖТ.
17. Курганов В.М. Эффективность логистики и конкурентоспособность России // Транспорт Рос. Федерации. 2013. №1 (44). С. 19–23.
18. Терещина Н.П., Тонг Хонг Фи. Факторы, влияющие на формирование конкурентных преимуществ в сфере транспорта // Транспортное дело России. 2021. № 5. С. 64–66.
19. Automated calculation method effect values in load securing elements fixed on a rolling stock / N.V. Vlasova, V.A. Olentsevich, V.Yu. Konyukhov et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 1064 (2021) 012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012042>.

### References

1. Strategiya razvitiya Kholdinga «RZHD» na period do 2030 goda (Elektronnyi resurs) [Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030 (Electronic resource)]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=804> (Accessed June 10, 2022).
2. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed June 7, 2022).
3. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 17.06.2008 g. № 877-р O strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda (Elektronnyi resurs) [Decree of the Government of the Russian Federation, dated June 17, 2008 no 877-р «On the strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030» (Electronic Resource)]. Available at: URL: <http://government.ru/docs/all/64817/> (Accessed June 8, 2022).
4. 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-р dated September 30, 2018 « On approval of the Comprehensive Plan for Modernization and Expansion of the trunk infrastructure for the period up to 2024»]. Available at: URL: <http://government.ru/docs/34297/> (Accessed June 12, 2022).
5. Shkurina L.V. Metodologiya formirovaniya konkurentosposobnoi ekonomicheskoi strategii zheleznodorozhnogo transporta [Methodology for the formation of a competitive economic strategy of the railway transport]. Doctor's thesis, Moscow, 2004, 48 p.
6. Faizrahmanova E.V., Olentsevich A.A., Mikailov R.A. Sovershenstvovanie upravleniya logisticheskimi izderzhkami predpriyatiya [Improving the management of logistics costs of the enterprise]. *Aktual'nye voprosy sovremennoi ekonomiki* [Topical issues of the modern economy], 2021, no. 1, pp. 70–74.
7. Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Otsenka udovletvorennosti kachestvom uslug gruzovykh zheleznodorozhnykh перевозок [Assessment of satisfaction with the quality of freight rail transportation services]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technical progress], 2021, no. 8, pp. 187–188.
8. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Neobkhodimost' razrabotki novykh proektnykh reshenii po rekonstruktsii konteynernykh 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 mezhdunarodnym uchastiem «Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte»* [Proceedings of the scientific and practical conference with international participation «Innovative technologies in railway transport»]. Moscow, 2022, pp. 96–104.

9. Formation of new principles and models of operation of structural units of the industry under the conditions of implementation of digital technologies / DA Lysenko, V.A. Olentsevich, N.V. Vlasova et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 1064 (2021). 012025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012025>.

10. Sokhranit' dorogoe (Elektronnyi resurs) [Save the expensive (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=890057> (Accessed June 10, 2022).

11. Faizrahmanova E.V., Ignat'eva E.I., Olentsevich A.A. Bezbar'ernaya transportnaya sreda kak sredstvo povysheniya effektivnosti gruzovykh perevozok [Barrier-free transport environment as a means of improving the efficiency of cargo transportation]. *Sbornik statei XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Povyshenie upravlencheskogo, ekonomicheskogo, sotsial'nogo i innovatsionno-tekhnicheskogo potentsiala predpriyatii, otraslei i narodno-khozyaistvennykh kompleksov»* [Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference «Improving the managerial, economic, social and innovative-technical potential of enterprises, industries and national economic complexes»]. Penza, 2020, pp. 210–213.

12. Nesterov V.N. Kachestvo obsluzhivaniya gruzovladel'tsev i potentsial transportnoi kompanii [The quality of cargo owners' service and the potential of a transport company]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management], 2011, no. 6, pp. 26–30.

13. Pekhterev F.S., Zamkovo A.A. O formirovanii nauchnykh zadach po sozdaniyu integral'noi evroaziatskoi transportnoi sistemy v kontekste razvitiya mezhduna-rodnykh transportnykh koridorov [On the formation of scientific tasks for the creation of an integrated Eurasian transport system in the context of the development of international transport corridors]. *Byulleten' OUS OAO «RZhD»* [Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC «Russian Railways»], 2018, no. 1, pp. 28–36.

14. Dinets D.A., Merkulov A.S. Primenenie printsipa upravleniya transportnym koridorom k organizatsii deyatelnosti Transsibirskoi magistrali [Application of the principle of transport corridor management to the organization of the Trans-Siberian Railway]. *Transportnoe pravo i bezopasnost'* [Transport Law and security], 2021, no. 3 (39), pp. 49–56.

15. Shanova S.E., Popova O.V., Gorev A.E. Transportno-ekspeditсионное obsluzhivanie [Freight forwarding services]. Moscow: Akademiya Publ., 2005. 432 p.

16. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 07.12.2016 g. № 2487r «Ob utverzhenii kontseptsii klientoorientirovannosti kholdinga «RZhD» v oblasti gruzovykh perevozok» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 7, 2016, no. 2487r «The concept of customer orientation of the Russian Railways Holding in the field of freight transportation»].

17. Kurganov V.M. Effektivnost' logistiki i konkurentosposobnost' Rossii [Logistics efficiency and competitiveness of Russia]. *Transport Rossiiskoi Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2013, no. 1 (44), pp. 19–23.

18. Tereshina N.P., Tong Hong Phi. Faktory, vliyayushchie na formirovanie konkurentnykh preimushchestv v sfere transporta [Factors influencing the formation of competitive advantages in the field of transport]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia], 2021, no. 5, pp. 64–66.

19. Automated calculation method effect values in load securing elements fixed on a rolling stock / N.V. Vlasova, V.A. Olentsevich, V.Yu. Konyukhov et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 1064 (2021) 012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012042>.

### Информация об авторах

**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](mailto:natalya.vlasova.76@list.ru).

**Оленевич Виктория Александровна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [olencevich\\_va@mail.ru](mailto:olencevich_va@mail.ru).

### Information about the authors

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

**Victoriya A. Olentsevich**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [olencevich\\_va@mail.ru](mailto:olencevich_va@mail.ru).

## Анализ факторов, оказывающих влияние на развитие интеллектуальных транспортных систем в субъектах Российской Федерации

Ю.О. Полтавская✉, В.Е. Гозбенко

Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

✉juliapoltavskaya@mail.ru

### Резюме

В связи с активным развитием технологий отмечается актуальность проведения исследований в области интеллектуальных транспортных систем, применение которых оказывает положительное влияние на инфраструктуру, транспортные средства и приносит пользу участникам дорожного движения – водителям и пассажирам, помогая сократить время в пути и повысить безопасность поездки. Целью данной статьи является оценка факторов, определяющих развитие интеллектуальных транспортных систем в регионах Российской Федерации. В работе применялись методы анализа научной литературы, экспертный опрос, многокритериальная оценка. Описан алгоритм исследований с использованием методов простого аддитивного взвешивания и комплексной пропорциональной оценки. Полученные результаты позволили сделать вывод, что в большей степени определяют развитие интеллектуальных транспортных систем такие факторы, как финансирование регионов, повышение безопасности дорожного движения, развитость транспортной инфраструктуры. К ограничениям исследования стоит отнести факт отсутствия статистических данных по некоторым факторам, поэтому в анализ было включено только 39 субъектов РФ и выбраны те факторы, которые поддаются количественной оценке. На основе методов простого аддитивного взвешивания и комплексной пропорциональной оценки проведен сравнительный анализ регионов России с целью выявления потенциальных возможностей для развития интеллектуальных транспортных систем. Сравнение проводилось с учетом присвоения как различных значений весов факторов, определенных экспертным путем, так и равных значений. Результаты могут быть использованы министерствами транспорта и дорожного хозяйства субъектов РФ для внедрения интеллектуальных транспортных систем.

### Ключевые слова

интеллектуальная транспортная система, безопасность дорожного движения, качество транспортных услуг, многокритериальная оценка, участники дорожного движения, улично-дорожная сеть, экспертная оценка

### Для цитирования

Полтавская Ю.О. Анализ факторов, оказывающих влияние на развитие интеллектуальных транспортных систем в субъектах Российской Федерации / Ю.О. Полтавская, В.Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 175–186. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).175-186.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 6.06.2022 г.; поступила после рецензирования: 10.06.2022 г.; принята к публикации: 14.06.2022 г.

### Благодарность

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект № МК-3495.2022.4).

## Analysis of factors influencing the development of intelligent transport systems in regions of Russian Federation

Ju.O. Poltavskaya✉, V.E. Gozbenko

Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

✉juliapoltavskaya@mail.ru

### Abstract

In connection with the active development of technologies, the relevance of conducting research in the field of intelligent transport systems is noted. The application of intelligent transport systems has an impact on infrastructure, vehicles and benefits road users such as drivers and passengers, helping to reduce travel time and improve travel safety. The purpose of this article is to assess the factors determining the development of intelligent transport systems in the regions of the Russian Federation. In the study, methods of scientific literature analysis, expert survey and multi-criteria assessment were used. The research algorithm is described using the methods of simple additive weighing and complex proportional estimation. The results obtained led to conclusion as to which factors determine the development of intelligent transport systems to a greater extent. These include: financing of regions for the implementation of intelligent transport systems, improving road safety, the development of transport infrastructure. The limitations of the study include the fact that there are no statistical data on some factors, therefore, only 39 subjects of the Russian Federation were included in the analysis and only those factors that can be quantified were selected. Based on the



simple additive weighing and complex proportional estimation methods, a comparative analysis of the regions of the Russian Federation was carried out in order to identify potential opportunities for the development of intelligent transport systems. The comparison was carried out taking into account both the assignment of different values of the factor weights determined by expert, and equal values. The results can be used by the ministries of transport and road facilities of the constituent entities of the Russian Federation for the implementation of intelligent transport systems.

### Keywords

intelligent transport systems, road safety, quality of transport services, multi-criteria assessment, road users, road network, expert review

### For citation

Poltavskaya Ju.O. Gozbenko V.E. Analiz faktorov, okazyvayushchikh vliyaniye na razvitiye intellektual'nykh transportnykh sistem v regionakh Rossiyskoy Federatsii [Analysis of factors influencing the development of intelligent transport systems in regions of Russian Federation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 175–186. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).175-186.

### Article Info

Received: June 6, 2022; revised: June 10, 2022; accepted: June 14, 2022.

### Acknowledgement

This work was supported by the Council for Grants of the President of the Russian Federation (Project No. MK-3495.2022.4).

### Введение

С ростом глобализации увеличивается спрос на качественные транспортные услуги. По состоянию на 1 января 2022 г. в РФ было зарегистрировано 59,6 млн транспортных средств (ТС), из них доля легковых составляет 76 %, что делает личный транспорт одним из самых популярных средств передвижения для населения страны [1]. Большое количество используемых индивидуальных ТС вызывает проблемы в транспортной системе, такие как рост количества дорожно-транспортных происшествий (ДТП), увеличение числа заторов и продолжительности простоев в них. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно на дорогах погибает около 1,35 млн чел. По этой причине некоторые страны теряют около 3 % от стоимости валового внутреннего продукта (ВВП) [2]. За последние годы отмечается активное внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) в различных регионах Российской Федерации, что способствует решению ряда проблем транспортной системы и позволяет повысить эффективность перевозочного процесса. Расширение сотрудничества между регионами России по внедрению ИТС требует проведения дополнительных исследований в области развития, преимуществ и назначения таких систем.

Объектом проводимого исследования являются ИТС. Целью – оценка факторов, определяющих их развитие, на основе теоретического обоснования. Был проведен анализ научной литературы, включая принципы класси-

кации, преимущества и значение ИТС, опыт применения, на основе которого создана система факторов, определяющих развитие ИТС.

### Теоретические аспекты функционирования интеллектуальных транспортных систем

Технологическое развитие регионов РФ также способствует увеличению количества научных исследований в области ИТС, однако единого официального определения этого понятия не существует. Различные авторы определяют его в своих работах на основе документов, стандартов и других исследований, связанных с транспортной системой и ИТС. Почти каждое определение идентифицирует ИТС как информационно-коммуникационную технологию, расположенную в инфраструктуре или ТС и выполняющую определенные функции (управление дорожным движением, повышение безопасности, уменьшение загрязнения и снижение транспортных заторов, повышение эффективности транспортной системы и качества обслуживания). Применение ИТС оказывает влияние на инфраструктуру, ТС и приносит пользу участникам дорожного движения – водителям, пассажирам, помогая сократить время в пути и повысить безопасность поездки [3–8].

В научной литературе [3, 9–11] представлены различные классификационные признаки ИТС: по масштабу, виду транспорта, управлению, местонахождению, выполняемым функциям и предоставляемым услугам. В работах большинства авторов отмечается, что функционирование ИТС осуществляется либо в ин-

фраструктуре, либо в ТС. Это один из самых простых способов классификации ИТС, так как он не подразумевает разделения в выполняемых функциях ИТС и характере работы системы. Однако стоит отметить, что формальной классификационной характеристики ИТС не существует. Страны, города, организации и предприятия могут классифицировать ИТС по своему усмотрению. Авторами не указывается наиболее подходящий способ группировки ИТС. В настоящее время разрабатываются новые методы классификации ИТС.

ИТС позволяют качественно и оперативно собирать, обрабатывать и предоставлять данные о транспортном потоке, снижать загруженность улично-дорожной сети за счет перераспределения потоков и изменения циклов работы светофорных объектов, повышать безопасность дорожного движения путем выявления ДТП и устранения препятствий на дороге, информировать водителей о дорожной ситуации и оптимальном маршруте движения. Внедрение ИТС в улично-дорожную сеть городов приносит ощутимую пользу пользователям транспортной системы: участникам дорожного движения, пассажирам общественного транспорта, организациям, участвующим в транспортной деятельности. В работе авторов [12] описываются результаты проведенного исследования преимуществ ИТС. Большинство респондентов, участвующих в опросе, считают, что применение ИТС позволит увеличить личные доходы населения, сократить время в пути и побудить к выбору более экологичного способа передвижения. Авторы также утверждают, что ИТС будут способствовать улучшению качества услуг общественного транспорта. С точки зрения экономических выгод ИТС могут снизить затраты на производство и реализацию товаров и услуг, оказать положительное влияние на стоимость недвижимости, арендную плату и годовой доход населения, а также создать дополнительные рабочие места. Для того чтобы оценить экономические выгоды от внедрения ИТС, важно определить финансовый ущерб, вызванный проблемами в транспортной системе. Основные издержки в транспортной сфере связаны с заторами и ДТП, и региональные и местные власти каждого региона стремятся уменьшить их влияние на общество. Отмечается, что ИТС используются для решения проблем в транспортной системе и повышения безопасности пассажиров, сокращения вре-

мени в пути и расхода топлива. При наличии необходимой информации, собранной и обработанной ИТС, участникам дорожного движения могут быть предложены наиболее эффективные решения в области услуг транспортной системы.

Что касается экономических преимуществ отдельных систем ИТС, по данным исследований, проведенных авторами [2], было установлено, что электронная система оплаты дорожных сборов повышает пропускную способность участка улично-дорожной сети, среднюю скорость транспортного потока и приносит доход в размере 1 млрд долл. в год; камеры автофиксации проезда на запрещающий сигнал светофора повышают безопасность дорожного движения, которая может быть оценена примерно в такую же сумму [2]. Система управления дорожным движением и информационная система водителя повышают мобильность и экономический эффект, которые оцениваются в 276,5 и 543,1 млн долл. в год соответственно. Это означает, что ИТС могут предоставлять необходимую информацию о дорожном движении в режиме реального времени, снижать количество ДТП, заторов, выбросов парниковых газов, повышать качество транспортных услуг, а также стимулировать пассажиров к выбору в пользу общественного транспорта [2].

### **Методология реализации разработки интеллектуальных транспортных систем**

Анализ научной литературы показал, что авторы в своих исследованиях используют разные методы для оценки развития и преимуществ ИТС: опрос, анкетирование, расчет стоимости транспортных заторов, оценка социально-экономической рентабельности инвестиций в развитие ИТС. Данный подход также позволяет сравнивать инвестиции в ИТС с инвестициями в другие виды деятельности. Для проведения анализа затрат и выгод необходимы дополнительные методы для оценки безопасности, загрязнения окружающей среды, эффективности организации дорожного движения и определения стоимостной выгоды. Ценность человеческой жизни определяется экономическим ущербом, причиненным пострадавшим или погибшим в ДТП [13]. Также отмечается, что одного анализа затрат и выгод недостаточно для определения влияния ИТС на экономику региона на макроэкономическом уровне. Анализ затрат и резуль-

татов имеет ограничения, такие как невозможность учесть определенные воздействия, следовательно, при социально-экономической оценке ИТС анализ затрат и результатов необходимо сочетать с другими методами (многокритериальный анализ) [2, 8, 11–16].

Таким образом, для определения экономического эффекта ИТС недостаточно исследований по сравнению возможностей применения таких систем в разных регионах. Самое главное – собрать все необходимые данные. Большинство авторов предлагают проводить опросы, мониторинг трафика или сбор данных с ИТС. Некоторые авторы утверждают, что влияние ИТС на экономику проявляется через воздействие на безопасность, окружающую среду [6] и эффективность транспортной системы, что также способствует развитию ИТС. Некоторые авторы использовали анализ затрат и результатов, корреляционно-регрессионный анализ для оценки конкретных случаев применения ИТС в определенной территориальной единице. В данном исследовании на базе научной литературы создана система факторов, определяющих развитие ИТС. Для их анализа используются методы простого аддитивного взвешивания (SAW) и комплексной пропорциональной оценки (COPRAS), основанные на многокритериальной теории полезности.

В результате проведенного литературного обзора была сформирована система факторов, определяющих развитие ИТС:

- скорость интернета;
- инвестиции в развитие региона;
- развитие отрасли торговли в межрегиональном направлении;
- уменьшение транспортных заторов на дорогах;
- повышение безопасности дорожного движения;
- развитие туризма;
- снижение негативного влияния автомобильного транспорта на окружающую среду;
- увеличение числа научных исследований в регионе;
- эффективное межрегиональное сотрудничество в области интеллектуальных транспортных систем;
- передовая практика по внедрению ИТС;
- наличие документации, стратегий, ориентированных на интеллектуальную мобильность населения;

– развитость транспортной инфраструктуры;

– активное участие государственного и частного секторов в развитии ИТС [2, 17, 18].

Экспертная оценка осуществлялась путем опроса респондентов, имеющих высшее образование и опыт работы в сфере транспорта. Эксперты оценивали факторы от одного до десяти в порядке важности. Для оценки согласованности мнений экспертов был рассчитан коэффициент конкордации Кендалла  $W$ :

$$W = \frac{12\tilde{S}}{k^2(n^3 - n)},$$

$$\tilde{S} = \sum_{j=1}^n \left( R_j - \frac{\tilde{R}_1 + \tilde{R}_2 + \dots + \tilde{R}_n}{n} \right)^2 =$$

$$= \sum_{j=1}^n \left( R_j - \frac{k(n+1)}{2} \right)^2,$$

где  $R_j$  – сумма  $j$  рангов;  $n$  – объем выборки;  $k$  – количество экспертов.

Чем ближе значение коэффициента конкордации  $W$  к 1, тем более согласованы мнения экспертов [15].

Метод простого аддитивного взвешивания (SAW) используется для определения фактора, который является наиболее существенным для развития ИТС в конкретном регионе. Этот метод является одним из простых и наиболее используемых методов, основанных на средневзвешенном значении [14]. Преимущество метода в том, что он представляет собой пропорциональное преобразование первичных данных. Чтобы применить метод, каждому фактору необходимо присвоить вес, после проведения опроса полученные экспертные данные нормализуются по формуле:

$$r_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}},$$

где  $r_{ij}$  – значение  $i$ -го показателя для  $j$ -го объекта.

Далее определяются весовые коэффициенты  $w$ , сумма которых должна быть равна 1 [15].

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1.$$

Значимость показателя рассчитывается путем деления суммы средних показателей на среднее оценочное значение каждого показателя по формуле:

$$\frac{\sum_{j=1}^n \bar{t}_j}{t_j}$$

Значение многокритериальной оценки  $j$ -й альтернативы  $S_j$  определяется по формуле:

$$S_j = \sum_{i=1}^m w_i r_{ij}.$$

По полученным значениям  $S_j$  элементы выборки ранжируются от наибольшего значения к наименьшему.

Метод COPRAS используется для ранжирования регионов РФ с наибольшими возможностями для развития ИТС. Он представляет собой метод комплексной оценки пропорциональности и многокритериального принятия решений, используемый для определения эффективности альтернатив. Он прост в применении и позволяет рассчитать как максимальные, так и минимальные критерии с учетом степени полезности, сравнить альтернативы и определить наиболее оптимальные из них. Принцип метода заключается в том, что относительная значимость  $Q_i$  сравнительных альтернатив определяется по их положительным ( $S_{+i}$ ) и отрицательным ( $S_{-i}$ ) свойствам; чем выше значение  $Q_i$ , тем эффективнее альтернатива:

$$S_j = \frac{r_{ij} w_i}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}, \quad (1)$$

где  $w_i$  – вес  $i$ -го показателя;  $r_{ij}$  – нормированное значение  $i$ -го показателя для  $j$ -го объекта.

Используя данный метод, можно определить значимость, степень полезности и приоритетность рассматриваемых вариантов. На первом этапе данные нормируются по формуле:

$$d_{ij} = \frac{x_{ij} \cdot q_i}{\sum_{j=1}^n x_{ij}}, \quad (2)$$

где  $x_{ij}$  – значение  $i$ -го критерия в  $j$ -м варианте решения;  $m$  – количество критериев;  $n$  – количество сравниваемых вариантов;  $q_i$  – значимость критериев  $i$ .

Сумма безразмерных оценочных значений  $d_{ij}$ , полученных для каждого критерия  $x_i$ , всегда равна значимости  $q_i$  этого критерия:

$$q_i = \sum_{j=1}^n d_{ij}. \quad (3)$$

На втором этапе рассчитываются суммы минимизирующих  $S_{-j}$  и максимизирующих  $S_{+j}$  расчетных и нормированных показателей по формулам:

$$S_{+j} = \sum_{i=1}^m d_{+ij}, \quad (4)$$

$$S_{-j} = \sum_{i=1}^m d_{-ij}, \quad (5)$$

В любом случае суммы  $S_{+j}$  и  $S_{-j}$  всех объектов всегда соответственно равны сумме критериев максимизации и минимизации:

$$S_{+} = \sum_{j=1}^n S_{+j} = \sum_{i=1}^m \cdot \sum_{j=1}^n d_{+ij}, \quad (6)$$

$$S_{-} = \sum_{j=1}^n S_{-j} = \sum_{i=1}^m \cdot \sum_{j=1}^n d_{-ij}, \quad (7)$$

На третьем этапе определяется относительная значимость сравниваемых вариантов на основе характеризующих их положительных  $S_{+j}$  и отрицательных  $S_{-j}$  свойств. На четвертом – происходит приоритизация объектов: чем выше  $Q_j$ , тем выше эффективность (приоритет) варианта.  $Q_j$  рассчитывается по формуле:

$$Q_j = S_{+j} + \frac{S_{-\min} \cdot \sum_{j=1}^n S_{-j}}{S_{-j} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{S_{-\min}}{S_{=j}}}. \quad (8)$$

На пятом этапе определяется эффективность  $N_j$  варианта  $a_j$  по формуле:

$$N_j = \left( \frac{Q_j}{Q_{\max}} \right) \cdot 100\%. \quad (9)$$

В зависимости от полученной степени полезности элементы выборки ранжируются от наибольшего значения к наименьшему [2].

Экспертный опрос содержит оценку тринадцати факторов, определяющих развитие ИТС, для методов SAW и COPRAS использовались только те факторы, которые можно было выразить в количественном значении.

## Результаты исследования

В ходе исследования был проведен опрос на выявление факторов, влияющих на развитие ИТС. Экспертам было предложено оценить каждый фактор по шкале от одного до десяти (1 – фактор совершенно не важен, 10 – фактор очень важен). Анализируя результаты, можно отметить, что наиболее высокие оценки экспер-

ты дали следующим факторам: активное участие государственного сектора, инвестиции, эффективное межрегиональное сотрудничество в сфере ИТС, повышение безопасности дорожного движения, развитость транспортной инфраструктуры региона (рис. 1). По мнению экспертов, к факторам, оказывающим наименьшее влияние на развитие ИТС, относятся: скорость интернета и развитие туризма.

Расчет коэффициента конкордации Кендалла (значение 0,52) показал, что мнения экспертов являются согласованными на высоком уровне. Впоследствии были выбраны только факторы, поддающиеся количественной оценке, рассчитана их значимость с использованием методов SAW и COPRAS и проведен сравнительный анализ потенциалов к развитию ИТС регионов РФ.

Для анализа были выбраны следующие показатели, влияющие на развитие ИТС:

- скорость интернета ( $X_1$  – средняя скорость интернета, мбит/с);
- федеральное финансирование на внедрение ИТС ( $X_2$  – объем федерального финанси-

рования, тыс. руб.);

- снижение транспортных заторов ( $X_3$  – потерянное время за год, ч);

- повышение безопасности дорожного движения ( $X_4$  – количество ДТП);

- развитие туризма ( $X_5$  – количество туристов);

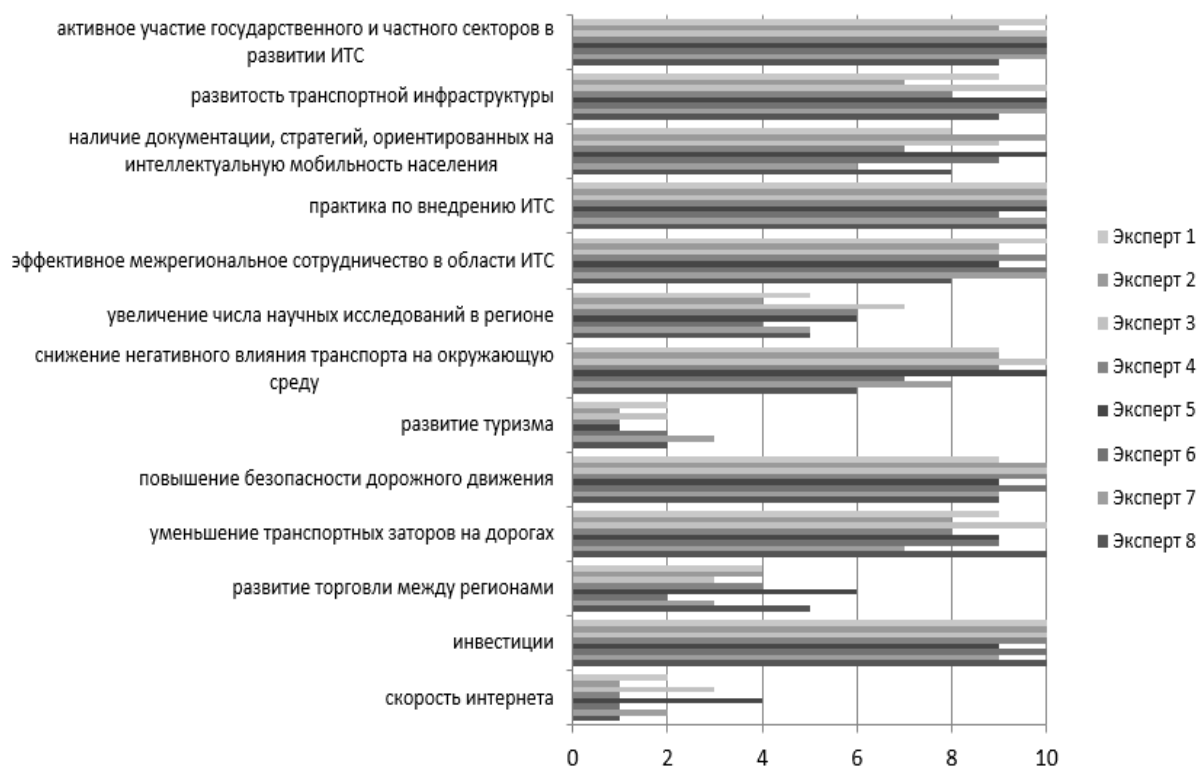
- снижение негативного воздействия транспорта на окружающую среду ( $X_6$  – объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от автомобильного транспорта, млн. т);

- увеличение количества научных исследований ( $X_7$  – количество студентов);

- развитость инфраструктуры ( $X_8$  – протяженность автомобильных дорог).

Первичные данные (2019–2021 гг.) собраны в базах данных Федеральной службы государственной статистики, аналитического центра при Правительстве Российской Федерации, Главного информационно-вычислительного центра Минобрнауки России, Госавтоинспекции, Росавтодора [1, 19–26].

В табл. 1 приведены расчеты, выполненные методом SAW с использованием различных



**Рис. 1.** Результаты опроса экспертов по оценке факторов, влияющих на развитие интеллектуальных транспортных систем

**Fig. 1.** Results of a survey of experts on the assessment of factors affecting the development of intelligent transport systems

весов  $w$  анализируемых факторов.  $S_j$  ранжируются от наибольшего к наименьшему: субъект с самым высоким  $S_j$  имеет больший потенциал развития ИТС.

На рис. 2 и 3 представлен рейтинг десяти субъектов РФ с наибольшим потенциалом для развития ИТС: в первом случае ранжирование проводилось на основе определенных экспертным путем весов факторов, во втором случае – вес факторов принимался равным (0,125). С разными весовыми значениями факторов Свердловская область на первом месте. Расчеты с одинаковым значением весов факторов дали близкие результаты (рис. 3).

Для расчетов по методу COPRAS использовались рассчитанные ранее веса факторов  $w$ . Данные нормализуются, и определяются факторы, которые усиливают / снижают развитие ИТС. В дальнейшем производятся расчеты по формулам (1) – (9): вычисляется значимость каждой альтернативы  $Q$  и определяется степень полезности каждого региона (субъекта РФ)  $N_j$ . По полученным результатам регионы ранжируются от максимального значения степени полезности к минимальному (табл. 2).

Анализируя значения степени полезности, можно констатировать, что субъект РФ с наибольшим значением имеет больше возможностей для развития ИТС.

**Таблица 1.** Нормированные значения факторов, определяющих развитие интеллектуальных транспортных систем и результаты метода SAW  
**Table 1.** Normalized values of the factors determining the development of intelligent transport systems and the results of the SAW method

Субъект РФ Region of Russian Federation	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$S_j$	Ранг
	Используемые веса ( $w$ ). Weights used ( $w$ )									
	0,03	0,18	0,16	0,18	0,03	0,16	0,09	0,17		
Саратовская область Saratov district	0,18	2,34	0,00	1,08	0,00	0,00	0,12	0,63	4,72	10
Московская область Moscow district	0,24	0,00	0,16	2,16	0,60	0,64	0,14	0,39	4,80	9
Санкт-Петербург St.-Petersburg district	0,24	0,00	0,32	1,08	0,54	1,60	0,41	0,87	4,92	8
Республика Татарстан Republic of Tatarstan	0,18	3,06	1,44	1,08	0,39	1,28	0,26	0,81	4,92	7
Нижегородская область Nizhniy Novgorod district	0,18	0,54	1,12	0,54	0,30	2,24	0,15	0,47	4,99	6
Республика Башкортостан Republic of Bashkortostan	0,18	0,00	0,00	1,62	0,36	1,92	0,18	0,89	5,21	5
Челябинская область Chelyabinsk district	0,12	0,00	1,28	1,26	0,15	2,40	0,16	0,45	5,67	4
Пермский край Perm region	0,18	0,00	0,00	1,62	0,00	0,00	0,04	0,69	7,43	3
Ростовская область Rostov district	0,09	2,52	0,96	2,16	0,12	1,76	0,24	0,47	7,61	2
Свердловская область Sverdlovsk district	0,12	3,78	0,80	2,34	0,33	1,44	0,21	0,58	8,81	1



**Рис. 2.** Анализ факторов, влияющих на развитие интеллектуальных транспортных систем регионов РФ (вес факторов одинаковый)

**Fig. 2.** Analysis of factors affecting the development of intelligent transport systems in the Russian Federation regions (Weight of factors is same)



**Рис. 3.** Анализ факторов, влияющих на развитие интеллектуальных транспортных систем регионов РФ (вес факторов разный)

**Fig. 3.** Analysis of factors affecting the development of intelligent transport systems in the Russian Federation regions (Weight of factors is different)

**Таблица 2.** Результаты применения метода COPRAS в изучении факторов, влияющих на развитие интеллектуальных транспортных систем в регионах РФ**Table 2.** Results of using COPRAS in the study of factors influencing the development of intelligent transport systems in the regions of the Russian Federation

Субъект РФ. RF subject	Расчеты с использованием различных значений весов факторов Calculations using different values of weight factors			Расчеты с использованием одинаковых значений весов факторов Calculations using the same values of weight factors		
	Суммарное Значение факторов. Total value of factors	Степень полезности, % Usefulness,%	Ранг Rank	Суммарное значение Факторов. Total value of factors	Степень полезности, % Usefulness,%	Ранг Rank
Саратовская область Saratov district	2,67	69,04	10	4,72	53,58	6
Московская область Moscow district	3,08	79,59	9	3,64	41,32	10
Санкт-Петербург St.-Petersburg district	3,11	80,43	8	3,78	42,91	9
Республика Татарстан Republic of Tatarstan	3,11	80,53	7	7,43	84,34	3
Нижегородская область Nizhniy Novgorod district	3,12	80,75	6	4,92	55,85	5
Республика Башкортостан Republic of Bashkortostan	3,42	88,52	5	4,08	46,31	7
Челябинская область Chelyabinsk district	3,43	88,74	4	5,21	59,14	4
Пермский край Perm region	3,50	90,68	3	3,91	44,38	8
Ростовская область Rostov district	3,70	95,76	2	7,61	86,38	2
Свердловская область Sverdlovsk district	3,86	100,00	1	8,81	100,00	1

Многие авторы сосредотачиваются на экономических преимуществах ИТС в определенных городах или регионах, при этом отсутствует сравнение субъектов РФ в развитии ИТС. Будущая модель может содержать более описательные показатели и факторы для анализа и изучения критериев, что позволит определить область, которая получит наибольшую выгоду от развития ИТС. Также для получения более точных результатов необходимо расширить список анализируемых субъектов РФ. Проведенные исследования сосредоточены на определении веса фактора только с учетом мнения экспертов, поэтому в дальнейшем необходимо использовать больше статистических данных по ИТС.

### Заключение

Анализ литературы и экспертный опрос выявили факторы, оказывающие влияние на развитие сферы ИТС с учетом особенностей функционирования экономики Российской Федерации в современных условиях. Авторы предлагают использовать многокритериальный метод оценки для анализа развития ИТС. Значение коэффициента конкордации Кендалла  $W$  свидетельствует о высокой согласованности мнений респондентов, их оценки могут использоваться в дальнейших расчетах. Проведенная многокритериальная оценка факторов развития ИТС с использованием метода SAW позволила определить регионы с наиболее высоким потенциалом развития ИТС.

### Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики : сайт // URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (Дата обращения: 24.05.2022).
2. Okuneviciute Neverauskiene L., Novikova M., Kazlauskienė E. Factors determining the development of intelligent transport systems // Business, Management and Economics Engineering. 2021. Vol. 19. Is. 2. P. 229–243.
3. Лебедева О.А. Повышение эффективности работы транспортной сети посредством применения интеллектуальных систем // Вестн. Ангар. гос. техн. ун-та. 2018. № 12. С. 189–191.



4. Михайлов А.Ю. Интегральный критерий оценки качества функционирования улично-дорожных сетей // Изв. Иркут. гос. экон. акад. 2004. № 2. С. 50–53.
5. Полтавская Ю.О. Развитие интеллектуальных транспортных систем с целью повышения функционирования транспортной сети // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2019. Т. 1. С. 202–203.
6. Ложкина О.В., Рогозинский Г.Г., Крипак М.Н. К вопросу о развитии интеллектуальных систем управления экологической безопасностью транспорта в больших городах-портах // Технологии построения когнитивных транспортных систем : материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. СПб., 2019. С. 153–157.
7. Антонов Д.В., Лебедева О.А. Основные принципы развития транспортных систем городов // Вестн. Ангар. гос. техн. акад. 2014. № 8. С. 149–155.
8. Лебедева О.А., Джавахадзе А.А. Транспортное планирование и интеграция ГИС-технологий // Вестн. Ангар. гос. техн. акад. ун-та. 2021. № 15. С. 145–149.
9. Katerna O. Intelligent Transport System: the problem of definition and formation of classification system // Economic Analysis. 0259(29(2)). 2019. P. 33–43.
10. Qi L. Research on Intelligent Transportation System Technologies and Applications // Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System. 2008. P. 529–531. DOI: 10.1109/PEITS.2008.124.
11. Scientific and Methodological Approaches to the Development of a Feasibility Study for Intelligent Transportation Systems / S. Zhankaziev, M. Gavrilyuk, D. Morozov et al. // Transportation Research Procedia. 2018. Vol. 36. P. 841–847. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.068.
12. Toulouki M. A., Vlahogianni E. I., Gkritza K. Perceived socio-economic impacts of cooperative Intelligent Transportation Systems: A case study of Greek urban road networks // In 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, MT-ITS 2017 – Proceedings. P. 733–737. DOI: 10.1109/MTITS.2017.8005609.
13. Клепцова Л.Н., Штоцкая А.А. Экономическая оценка влияния мероприятий по повышению безопасности дорожного движения на уровень дорожно-транспортных происшествий // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства : междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2016. С. 81–89.
14. George J., Badoniya P., Naqvi H.A. Integration of Simple Additive Weighting (SAW) and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) for supplier selection // International Journal for Science and Advance Research In Technology. 2018. Vol. 4. Is. 8. P. 18–22.
15. Ginevicius R., Podvezko V. The problem of compatibility of various multiple criteria evaluation methods // Business: Theory and Practice. 2008. Vol. 9 (1). P. 73–80.
16. Samadi S., Rad A.P., Kazemi F.M., Jafarian H. Performance evaluation of intelligent adaptive traffic control systems: a case study // Journal of Transportation Technologies. 2012. Vol. 2. P. 248–259.
17. Taimouri A., Emamisaheh K. Providing performance evaluation indicators for intelligent transportation systems (The Case Study of Tehran-Karaj Freeway Located in Iran) // Journal of Transportation Technologies. 2020. Vol. 10. P. 144–153. DOI: 10.4236/jtts.2020.102009.
18. Полтавская Ю.О. Определение показателей оценки эффективности интеллектуальных транспортных систем // Сб. науч. тр. Ангар. гос. техн. ун-та. 2022. № 19. С. 130–137.
19. Национальный туристический рейтинг-2020 // Russia-Rating.ru : сайт // URL: <https://russia-rating.ru/info/18797.html?ysclid=14z4e1wkaw391892200> (Дата обращения: 24.05.2022).
20. Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики. Экология и экономика: тенденция к декарбонизации / Аналитический центр при правительстве Рос. Федерации. М., 2020. Вып. № 66. Окт. 17 с. <https://e-cis.info/upload/iblock/520/520a5eee087274f9007f341e5865b0b3.pdf> (Дата обращения: 24.05.2022).
21. Развитие интернета в регионах России // Яндекс : сайт // URL: [https://yandex.ru/company/researches/2016/ya\\_internet\\_regions\\_2016?ysclid=14z45mqhcu888897363](https://yandex.ru/company/researches/2016/ya_internet_regions_2016?ysclid=14z45mqhcu888897363) (Дата обращения: 24.05.2022).
22. Traffic congestion ranking // TomTom Traffic Index. // URL: [https://www.tomtom.com/en\\_gb/traffic-index/ranking/?country=RU](https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ranking/?country=RU) (Дата обращения: 20.05.2022).
23. Протяженность автомобильных дорог общего пользования по субъектам Российской Федерации за 2019 год // Федеральная служба государственной статистики : сайт. URL: [rosstat.gov.ru/storage/mediabank/t2-2\(1\).xls](http://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/t2-2(1).xls) (Дата обращения: 24.05.2022).
24. О внесении изменений в распоряжение Правительства РФ от 21.12.2019 N 3136-р : распоряжение Правительства РФ от 03.02.2022 № 169-р // Правительство России : сайт. URL: <http://government.ru/docs/44485/> (Дата обращения: 24.05.2022).
25. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения : сайт. // URL: <http://stat.gibdd.ru/> (Дата обращения: 24.05.2022).
26. МИРЭА – Российский технологический университет : главный информационно-вычислительный центр ГИВЦ Минобрнауки России : сайт // URL: <https://miccedu.ru/> (Дата обращения: 24.05.2022)

## References

1. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki (Elektronnyi resurs) [Federal State Statistics Service (Electronic resource)]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (Accessed May 24, 2022).
2. Okuneviciute Neverauskiene L., Novikova M., Kazlauskienė E. Factors determining the development of intelligent transport systems // Business, Management and Economics Engineering. 2021. Vol. 19. Is. 2. Pp. 229–243.
3. Lebedeva O.A. Povyshenie effektivnosti raboty transportnoi seti posredstvom primeneniya intellektual'nykh sistem [Improving the efficiency of the transport network through the use of intelligent systems]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Angarsk State Technical University], 2018, no. 12, pp. 189–191.

4. Mikhailov A.Yu. Povyshenie effektivnosti raboty transportnoi seti posredstvom primeneniya intellektual'nykh sistem [Integral criterion for assessing the quality of the functioning of street and road networks]. *Izvestiya Irkutskoi gosudarstvennoi ekonomicheskoi akademii* [Bulletins of the Irkutsk State Economic Academy], 2004, no. 2, pp. 50–53.
5. Poltavskaya J.O. Razvitiye intellektual'nykh transportnykh sistem s tsel'yu povysheniya funktsionirovaniya transportnoi seti [Development of intelligent transport systems to improve the functioning of the transport network]. *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technical progress], 2019, no. 1, pp. 202–203.
6. Lozhkina O.V., Rogozinskii G.G., Kripak M.N. K voprosu o razvitiu intellektual'nykh sistem upravleniya ekologicheskoi bezopasnost'yu transporta v bol'shikh gorodakh-portakh [To the question of the development of intelligent systems for managing the environmental safety of transport in large port cities]. *Materialy vsrossiyskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Tekhnologii postroyeniya kognitivnykh transportnykh sistem»* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference with international participation «Technologies for constructing cognitive transport systems»]. Saint-Petersburg, 2019, pp. 153–157.
7. Antonov D.V., Lebedeva O.A. Osnovnye printsipy razvitiya transportnykh sistem gorodov [Basic principles for the development of transport systems of cities]. *Vestnik Angarskoi gosudarstvennoi tekhnicheskoi akademii* [Bulletin of the Angarsk State Technical Academy], 2014, no. 8, pp. 149–155.
8. Lebedeva O.A., Dzavakhadze A.A. Transportnoe planirovaniye i integratsiya GIS-tekhnologii [Transport planning and integration of GIS technologies]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Angarsk State Technical University], 2021, no. 15, pp. 145–149.
9. Katerna O. Intelligent Transport System: the problem of definition and formation of classification system // *Economic Analysis*, 0259(29(2)), 2019, pp. 33–43.
10. Qi L. Research on Intelligent Transportation System Technologies and Applications // *Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System*. 2008. Pp. 529–531. DOI: 10.1109/PEITS.2008.124.
11. Scientific and Methodological Approaches to the Development of a Feasibility Study for Intelligent Transportation Systems / S. Zhankaziev, M. Gavriyuk, D. Morozov et al. // *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. Pp. 841–847. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.068.
12. Toulouki M. A., Vlahogianni E. I., Gkritza K. Perceived socio-economic impacts of cooperative Intelligent Transportation Systems: A case study of Greek urban road networks // *In 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, MT-ITS 2017 – Proceedings*. P. 733–737. DOI: 10.1109/MTITS.2017.8005609.
13. Kleptsova L.N., Shtotskaya A.A. Ekonomicheskaya otsenka vliyaniya meropriyatiy po povysheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na uroven' dorozhno-transportnykh proisshestvii [Economic assessment of the impact of measures to improve road safety on the level of traffic accidents]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnyye sistemy Sibiri. Razvitiye transportnoi sistemy kak katalizator rosta ekonomiki gosudarstva»* [Proceedings of the International scientific and practical conference «Transport systems of Siberia. Development of the transport system as a catalyst for the growth of the state economy»]. Krasnoyarsk, 2016, pp. 81–89.
14. George J., Badoniya P., Naqvi H.A. Integration of Simple Additive Weighting (SAW) and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) for supplier selection // *International Journal for Science and Advance Research In Technology*. 2018. Vol. 4. Is. 8. Pp. 18–22.
15. Ginevicius R., Podvezko V. The problem of compatibility of various multiple criteria evaluation methods // *Business: Theory and Practice*. 2008. Vol. 9 (1). Pp. 73–80.
16. Samadi S., Rad A.P., Kazemi F.M., Jafarian H. Performance evaluation of intelligent adaptive traffic control systems: a case study // *Journal of Transportation Technologies*. 2012. Vol. 2. Pp. 248–259.
17. Taimouri A., Emamisaheh K. Providing performance evaluation indicators for intelligent transportation systems (The Case Study of Tehran-Karaj Freeway Located in Iran) // *Journal of Transportation Technologies*. 2020. Vol. 10. Pp. 144–153. DOI: 10.4236/jtts.2020.102009.
18. Poltavskaya Yu.O. Opredelenie pokazatelei otsenki effektivnosti intellektual'nykh transportnykh sistem [Determination of indicators for evaluating the effectiveness of intelligent transport systems]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Angarsk State Technical University], 2022, no. 19, pp. 130–137.
19. Natsional'nyi turistichestkii reiting-2020 (Elektronnyi resurs) [National tourism rating-2020 (Electronic resource)]. Available at: <https://russia-rating.ru/info/18797.html?ysclid=l4z4e1kwak391892200> (Accessed May 24, 2022).
20. Poltavskaya Yu.O. Opredelenie pokazatelei otsenki effektivnosti intellektual'nykh transportnykh sistem [Determination of indicators for evaluating the effectiveness of intelligent transport systems]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Collection of scientific works of the Angarsk State Technical University], 2022, no. 19, pp. 130–137.
21. Razvitiye interneta v regionakh Rossii (Elektronnyi resurs) [Development of the Internet in the regions of Russia (Electronic resource)]. Available at: [https://yandex.ru/company/researches/2016/ya\\_internet\\_regions\\_2016?ysclid=l4z45mqhcu88897363](https://yandex.ru/company/researches/2016/ya_internet_regions_2016?ysclid=l4z45mqhcu88897363) (Accessed May 24, 2022).
22. Traffic congestion ranking | TomTom Traffic Index (Electronic resource). Available at: [https://www.tomtom.com/en\\_gb/traffic-index/ranking/?country=RU](https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ranking/?country=RU) (Accessed May 20, 2022).
23. Prot'yazhennost' avtomobil'nykh dorog obshchego pol'zovaniya po sub'yektam Rossiiskoi Federatsii za 2019 god (Elektronnyi resurs) [The length of public roads in the constituent entities of the Russian Federation for 2019 (Electronic resource)]. Available at: [rosstat.gov.ru/storage/mediabank/t2-2\(1\).xls](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/t2-2(1).xls) (Accessed May 24, 2022).
24. Dokumenty - Pravitel'stvo Rossii (government.ru). Rasporyazheniye ot 3 fevralya 2022 goda №169-r (Elektronnyi resurs) [Documents - Government of Russia (government.ru). Order dated February 3, 2022, no. 169-r. (Electronic resource)]. Available at: <http://government.ru/docs/44485/> (Accessed May 24, 2022).
25. Svedeniya o pokazatelyakh sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya (Elektronnyi resurs) [Information about road safety indicators (Electronic resource)]. Available at: <http://stat.gibdd.ru/> (Accessed May 24, 2022).

26. Glavnyi informatsionno-vychislitel'nyi tsentr GIVTS Minobrnauki Rossii (Elektronnyi resurs) [Main Information and Computing Center of the GIVC of the Ministry of Education and Science of Russia (Electronic resource)]. Available at: <https://miccedu.ru/> (Accessed May 24, 2022).

#### **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](mailto:juliapoltavskaya@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](mailto:vgozbenko@yandex.ru).

#### **Information about the authors**

**Julia O. Poltavskaya**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management of automobile transport, Angarsk State Technical University, Angarsk; e-mail: [juliapoltavskaya@mail.ru](mailto:juliapoltavskaya@mail.ru).

**Valerii E. Gozbenko**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Management of automobile transport, Angarsk State Technical University, Angarsk; e-mail: [vgozbenko@yandex.ru](mailto:vgozbenko@yandex.ru).

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА  
ИНФОРМАЦИИ**

**COMPUTER SCIENCE, INFORMATION MANAGEMENT  
AND PROCESSING**

## Анализ показателей травматизма в 2020 и 2021 г. на иркутских автодорогах общего пользования

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

✉aslamovav@yandex.ru

### Резюме

В статье осуществлено сравнение основных показателей травматизма за 2020–2021 гг. на иркутских автомобильных дорогах по статистическим данным Госавтоинспекции. Анализ показал отсутствие четкого снижения относительных показателей дорожного травматизма в 2021 г.: по сравнению с 2020 г. возросло число происшествий (9 %), увеличилось число травмируемых (14,5 %), в 6 раз вырос коэффициент тяжести происшествий. Выявлен сезонный характер динамики показателей дорожных происшествий. Например, рост численности дорожно-транспортных происшествий в 2021 г. по сравнению с 2020 г. наблюдался в апреле, октябре и декабре, рост числа смертельных дорожных происшествий отмечался в январе, феврале, марте, апреле и июле 2021 г. Поэтому для корректности анализа были использованы вычисленные среднемесячные данные Госавтоинспекции. Распределение происшествий по времени суток не изменилось. Наибольшее число дорожных происшествий совершается с 17 до 20 часов, что можно объяснить увеличением интенсивности движения транспортных средств после рабочего дня и наступлением сумеречного времени суток. Ужесточение административных взысканий за несоблюдение водителями правил дорожного движения обеспечило в 2021 г. небольшое снижение происшествий, а именно суммарная численность иркутских пьяных водителей за рулем всех видов транспортных средств в 2021 г. снизилась на 1,68 %, но все еще остается достаточно большим 11,75 %. Следует отметить, что в 90 % случаев в 2020 и 2021 гг. причиной происшествий были водители личных легковых автомобилей в пьяном состоянии. Водители в возрасте от 30 до 40 лет наиболее часто совершают нарушение правил дорожного движения. Показаны значимые причины и факторы транспортных происшествий. В 2021 г. подавляющее число дорожно-транспортных происшествий (40,2 %) происходит по 2 причинам: столкновения 41,62 % (39,49 % погибших и 48,28 % раненых); наезда транспортных средств на пешехода 29,35% дорожно-транспортных происшествий (26,43 % погибших и 22,17 % раненых). Такие же основные причины реализации дорожно-транспортных происшествий были в 2020 г. Участились в 1,26 раза случаи наезда на стоящий автомобиль. В наезде на пешеходов в 60 % случаях виновны водители автомобилей, в 40 % – пешеходы. Из них 36 % наездов совершается в темное время суток, 35 % таких происшествий происходит на пешеходных переходах. Наблюдается существенный рост дорожных происшествий и числа пострадавших подростков, причем в 54,8 % таких случаев страдают дети - пассажиры. Сократилось только число дорожных происшествий с нарушением правил перевозки детей и с пешеходами-детьми.

### Ключевые слова

дорожно-транспортное происшествие, правила дорожного движения, дорожный травматизм, факторы транспортных происшествий, пешеход, водитель, транспортное средство

### Для цитирования

Асламова В.С. Анализ показателей травматизма в 2020 и 2021 гг. на иркутских автодорогах общего пользования / В.С. Асламова, П.А. Кузнецова, А.А. Асламов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 188–201. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).188-201

### Информация о статье

поступила в редакцию: 26.05.2022 г.; поступила после рецензирования 7.06.2022 г.; принята к публикации 8.06.2022 г.

## Analysis of injury indicators in 2020 and 2021 in Irkutsk public highways

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

✉aslamovav@yandex.ru

### Abstract

The article compares the main indicators of injuries for 2020-2021 on the Irkutsk highways according to the statistics of the State traffic inspectorate. The analysis showed the absence of a clear decrease in the relative indicators of road injuries in 2021: as compared to 2020, the number of accidents increased (9 %), the number of injured (14,5 %) increased, and the accident severity coefficient increased by 6 times. The seasonal nature of the dynamics of traffic accidents was revealed. For example, an increase in the number of road accidents in 2021 as compared to 2020 was observed in April, October and December, an increase in the

number of fatal road accidents was noted in January, February, March, April and July 2021. Therefore, for the correctness of the analysis, the calculated average monthly data of the State traffic inspectorate were used. The distribution of incidents by time of day has not changed. The greatest number of road accidents occurs from 17:00 to 20:00, which can be explained by an increase in vehicle traffic after the working day and the onset of twilight. The tightening of administrative penalties for non-compliance with traffic rules by drivers ensured a slight decrease in accidents in 2021, namely, the total number of drunk drivers in Irkutsk driving all types of vehicles in 2021 decreased by 1.68%, still remaining quite large (11,75 %). It should be noted that in 90 % of cases, both in 2020 and 2021 the drivers of a personal car in a drunken state were the culprit of the accidents. Drivers between the ages of 30 and 40 are the most likely to commit traffic violations. Significant causes and factors of transport accidents are shown. In 2021, the vast majority of road traffic accidents (40,2 %) occur for 2 reasons: collisions 41,62 % (39,49 % dead and 48,28% injured); collision of a vehicle with a pedestrian 29,35 % of accidents (26,43 % dead and 22,17 % injured). The same main reasons for the traffic accidents have been noted in 2020. Cases of collision with a standing car became more frequent by 1,26 times. In 60% of collisions with pedestrians, car drivers are guilty, in 40% - the pedestrians. Of these, 36% of collisions are made at night, 35 % of such incidents occur at pedestrian crossings. There has been a significant increase in traffic accidents with, and the number of affected adolescents, and in 54.8 % of such cases, child passengers suffered. The only decrease was in the number of traffic accidents with violation of the rules for transporting children and with child pedestrians.

### Keywords

traffic accident, traffic rules, road injuries, factors of traffic accidents, pedestrian, driver, vehicle

### For citation

Aslamova V.S., Kuznetsova P.A., Aslamov A.A. Analiz pokazatelei travmatizma v 2020 i 2021 gg. na irkutskikh avtodorogakh obshchego pol'zovaniya [Analysis of injury indicators in 2020 and 2021 in Irkutsk public highways]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 188–201. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).188-201

### Article info

Received: May 26, 2022; revised: June 7, 2022; accepted: June 8, 2022.

### Актуальность исследования

Численности дорожно-транспортных происшествий (ДТП), погибших и травмированных в них людей снижается во всех субъектах России, но по-прежнему остается серьезной социально-экономической проблемой [1–7]. Известно, что показатель жертв ДТП многократно превосходит показатели смертности и травматизма по сравнению с авариями на железных дорогах и в авиации. Согласно рейтингу RAEX-2019 показатель социального риска (число смертей 12,4 в ДТП на 100 тыс. жителей) в России совпадает с аналогичным показателем в США [5]. По относительным показателям тяжести ДТП Россия опережает почти в 3 раза европейские страны и более чем 7 раз США [5, 6].

В России сложная ситуация с подростковым травматизмом. Значение транспортного индекса (число ДТП с участием подростков на 100 ед. транспортных средств (ТС)) в 10–30 раз выше, чем в европейских странах [5].

О значимости исследования говорит то, что в 2020 г. Иркутская область (ИО) заняла 16-е место по численности пострадавших в ДТП [7]. Большая проблема для России и ИО – высокий уровень подросткового травматизма на автодорогах [8–13].

Сравнительный анализ статистических показателей ДТП позволяет судить об уровне

аварийности в рассматриваемом регионе, демонстрирует тенденции его изменения, обеспечивает поиск способов предупреждения ДТП. Учет динамики изменения показателей ДТП позволяет установить причинно-следственную связь между происшествиями и причинами их реализации. Это основа повышения эффективности профилактических мероприятий и безопасности дорожного движения [6, 14, 15].

Цель работы – выявление существенных причин и факторов ДТП в ИО на основе анализа данных статистики Госавтоинспекции [16] за 2020 и 2021 гг.

### Анализ факторов и причин дорожно-транспортных происшествий, а также показателей травматизма

Данные статистики ДТП [16] анализировались в MS Excel.

Сравнение значений основных итоговых показателей ДТП и коэффициента тяжести ДТП  $k$ , равного отношению числа погибших к числу раненых в ДТП [6], за 2020–2021 гг. приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что в 2021 г. итоговая численность ДТП и раненых возросла в 1,090 и 1,145 раз соответственно, а значение  $k$  уменьшилось в 1,60 раз.

**Таблица 1.** Итоговые значения основных показателей дорожно-транспортных происшествий за 2020–2021 гг.**Table 1.** Comparison of the final values of the main indicators of road accidents

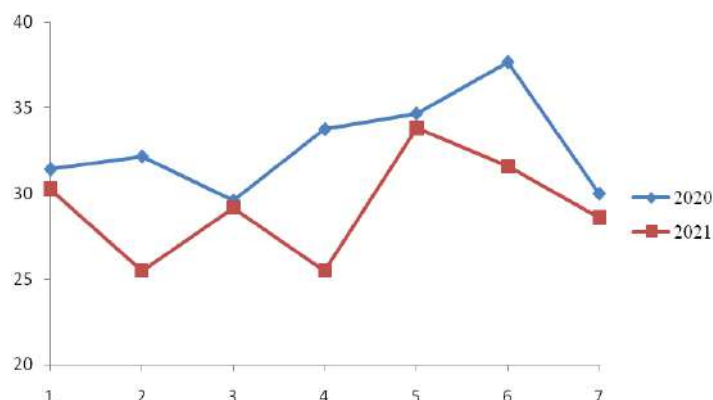
Показатель	2020	Аналогичный показатель прошлого года, %	2021	Аналогичный показатель прошлого года, %
Количество дорожно-транспортных происшествий	210	–16,7	229	9,0
Погибло	28	7,7	20	–28,6
Ранено	255	–22,5	292	14,5
$k$	0,1098	–	0,0685	–

В исследованиях [17, 18] показано, что изменение показателей ДТП носит сезонный характер. Рост численности ДТП в 2021 г. по сравнению с 2020 г. наблюдался в апреле, октябре и декабре, увеличение числа смертельных ДТП – в январе, феврале, марте, апреле и июле 2021 г. Для корректности анализа были использованы вычисленные среднемесячные данные Госавтоинспекции.

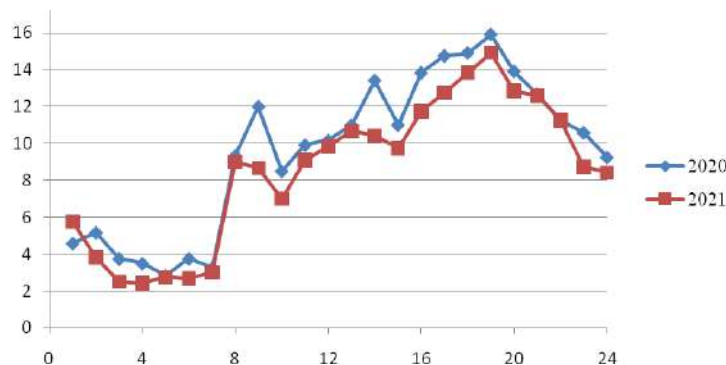
На рис. 1 представлено распределение среднемесячной численности ДТП  $d_c$  по дням недели.

Максимальное число ДТП в 2020 г. приходилось на субботу, в 2021 г. – на пятницу. Видно общее снижение  $d_c$  по сравнению с 2020 г. Распределение  $d_c$  по времени дня дано на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что наибольшее число ДТП происходит с 17 до 20 ч, что можно объяснить увеличением интенсивности движения ТС после рабочего дня и наступлением сумеречного времени суток [13]. Распределение  $d_c$  по категориям пострадавших в результате ДТП показано на рис. 3.



**Рис. 1.** Распределение среднемесячного числа дорожно-транспортных происшествий  $d_c$  по дням недели  
**Fig. 1.** Distribution of the average monthly number of road traffic accidents  $d_c$  by days of the week



**Рис. 2.** Распределение среднемесячного числа дорожно-транспортных происшествий  $d_c$  по времени дня  
**Fig. 2.** Distribution of the monthly average traffic accidents  $d_c$  by time of day

Из рис. 3 следует, что чаще всего в ДТП пострадавшими являются водители ТС (46,7%), их пассажиры (37,2%) и пешеходы (30,0%) (процентка указана за 2021 г.). Также прослеживается динамика снижения  $d_c$  в 2021 г.

Одна из основных целей анализа показателей ДТП – выявление вины лиц, которые к нему причастны [6]. Пьяный водитель за рулем – одна из причин ДТП не только в РФ, ИО, но и во всем мире [19–21]. ИО занимает 1-е место

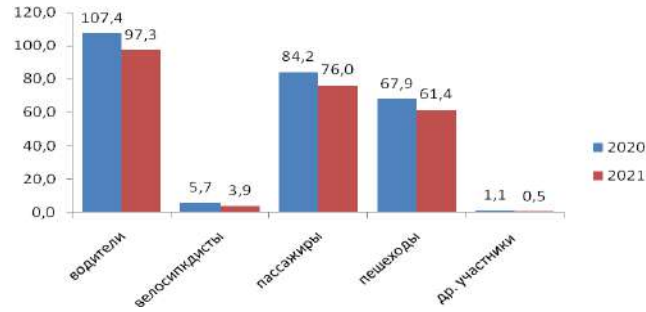


Рис. 3. Распределение среднемесячного числа дорожно-транспортных происшествий  $d_c$  по категориям пострадавших

Fig. 3. Distribution of the monthly average road traffic accidents  $d_c$  by categories of victims

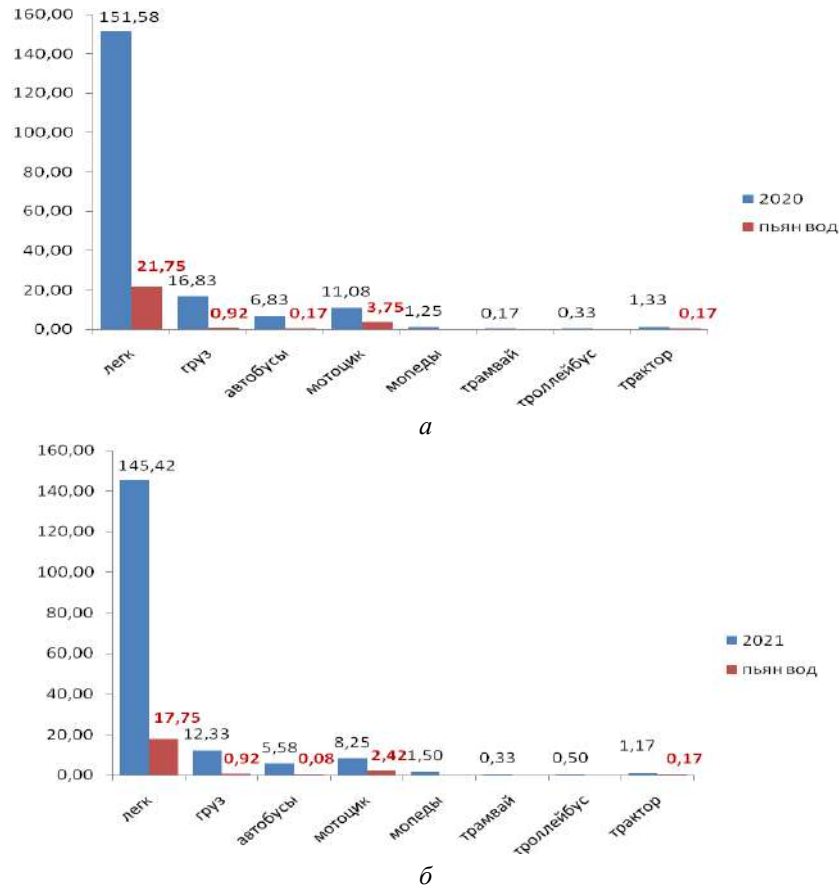


Рис. 4. Среднемесячное число транспортных происшествий по причине нарушений правил дорожного движения водителями различных транспортных средств (красным цветом отмечены происшествия с водителем в состоянии алкогольного опьянения):

$a$  – 2020 г.;  $б$  – 2021 г.

Fig. 4. The average monthly number of traffic accidents due to violations of traffic rules by drivers of various vehicles (incidents with an intoxicated driver are marked in red):

$a$  – 2020;  $b$  – 2021.



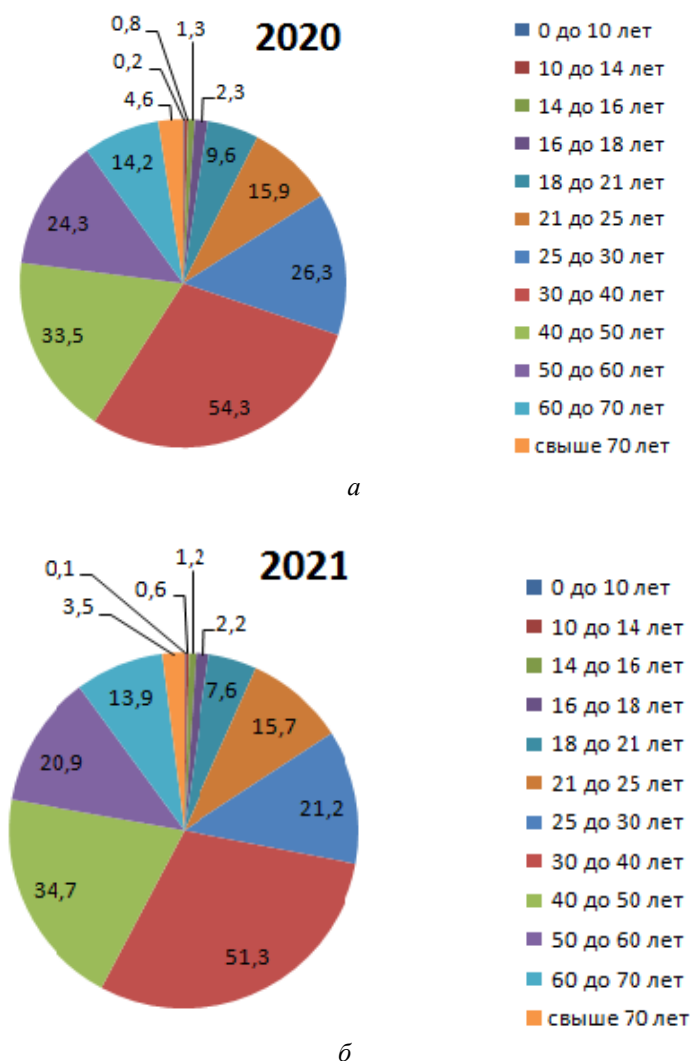
в РФ по обнаружению водителей, повторно севших за руль в алкогольном состоянии [22]. Среднемесячные данные о количестве ДТП по причине нарушения правил дорожного движения (ПДД) водителями различных ТС, в том числе и в состоянии опьянения, за 2020–2021 гг. представлены на рис. 4.

Из данных рис. 4 видно, что ужесточение административных взысканий за несоблюдения водителями ПДД обеспечило в 2021 г. (рис. 4, б) небольшое уменьшение числа ДТП (АППГ= –7,15 %), тем не менее количество таких

ДТП (181) остается до сих пор высоким. В регионе суммарная численность Иркутских пьяных водителей за рулем всех видов ТС в 2021 г. снизилась на 1,68 %, но все еще остается достаточно большой – 11,75 % (АППГ= –12,49 %). Следует отметить, что в 90 % случаев в 2020 и 2021 гг. был пьян водитель личного легкового автомобиля [21].

Диаграммы распределений значений  $d_c$ , произошедших из-за нарушения ПДД водителями, в зависимости от их возраста представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что наиболее часто нару-



**Рис. 5.** Диаграмма распределения среднемесячного числа дорожно-транспортных происшествий, произошедших в результате нарушения правил дорожного движения водителями, в зависимости от их возраста:

*a* – 2020 г.; *б* – 2021 г.

**Fig. 5.** Diagram of the distribution of the average monthly number of road accidents that occurred as a result of violation of traffic rules by drivers, depending on their age:

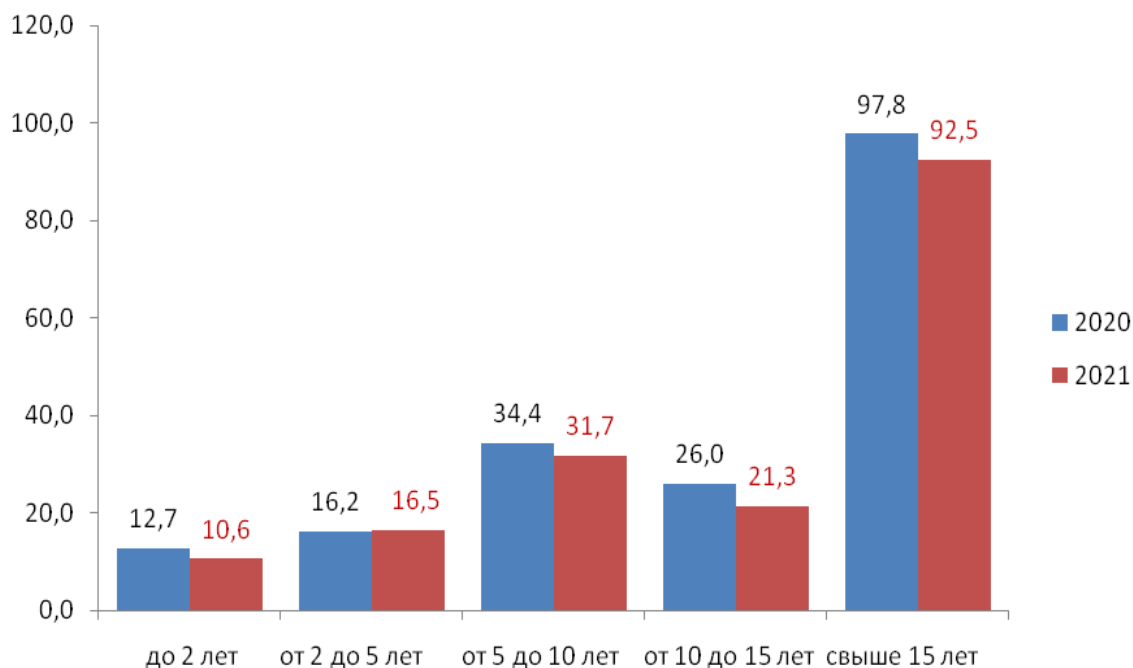
*a* – 2020; *b* – 2021

шают ПДД водители в возрасте от 30 до 40 лет. Большое число нарушений ПДД совершается также водителями в возрасте 25 – 30 лет и 40 – 60 лет. Это можно объяснить снижением с возрастом концентрации внимания, замедлением реакции на дорожную ситуацию, повышенной утомляемостью, а также завышенной оценкой своих профессиональных навыков.

Распределение значений  $d_c$  по стажу управления ТС водителем дано на рис. 6.

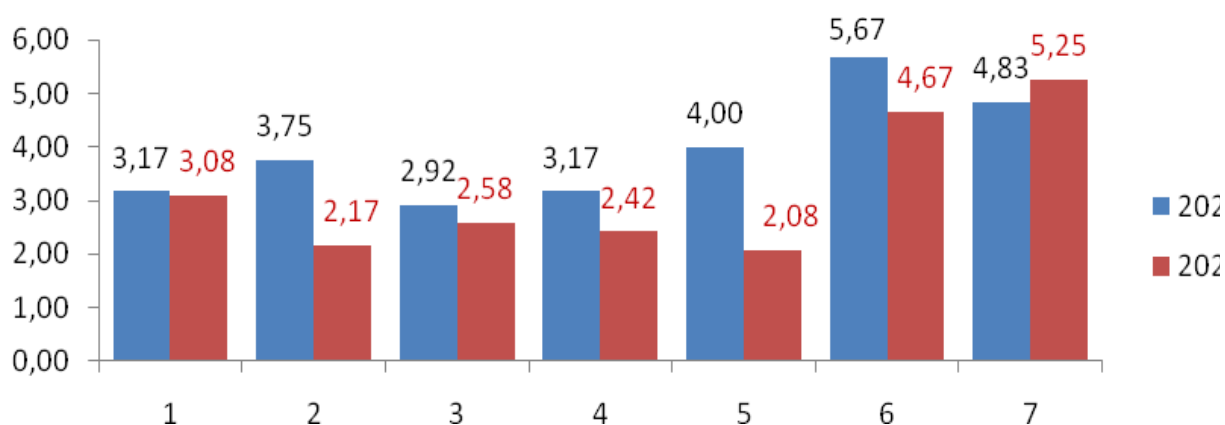
Из рис. 6 можно установить, что с увеличением стажа вождения (более 15 лет) число ДТП, вызванных нарушением ПДД, в 2020 г. увеличилось в 3,76 раза, а в 2021 г. – в 4,34 раза. Реже всего ПДД нарушают водители со стажем до 5 лет. Сделанные выводы согласуются с исследователями [23].

Распределение ДТП, вызванных нарушением ПДД водителями в алкогольном опьянении по дням недели представлено на рис. 7.



**Рис. 6.** Распределение среднемесячного числа дорожно-транспортных происшествий по стажу управления транспортным средством

**Fig. 6.** Distribution of the average monthly number of road traffic accidents by driving experience



**Рис. 7.** Распределение по дням недели среднемесячного числа дорожно-транспортных происшествий, вызванных нарушениями правил дорожного движения из-за алкогольного опьянения водителей

**Fig. 7.** Distribution by days of the week of the average monthly number of traffic accidents, caused by traffic violations due to alcohol intoxication of drivers

Из рис. 7 следует, что наибольшее число нарушений ПДД водителями ТС в алкогольном опьянении приходится на выходные дни. На рис. 8 приведены данные о ДТП с наездом на пешеходов.

В 2021 г. в наезде на пешеходов при ДТП в 60 % случаях виновны водители ТС, в 40 % – пешеходы. В темное время суток со-

вершено 36 % наездов, на пешеходных переходах – 35 %.

Численность ДТП на пешеходных переходах в зависимости от системы управления движением ТС, виновности участников движения и мест реализации ДТП показана на рис. 9.

Видно, что на пешеходных переходах происходит 21,4 % ДТП, из них в 20 % – по

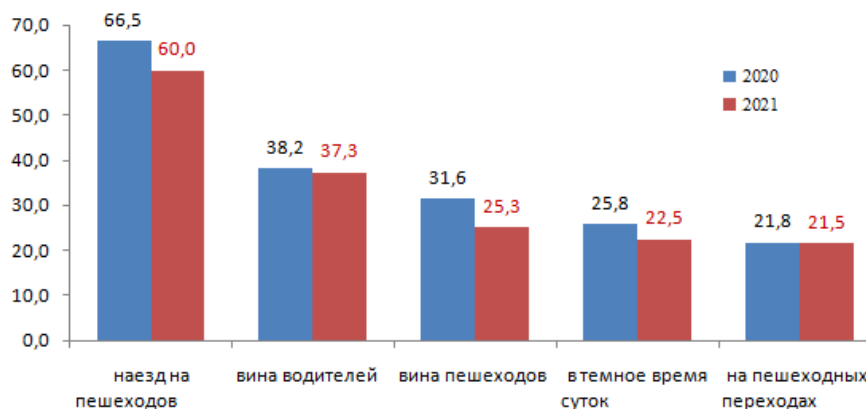


Рис. 8. Среднемесячное число дорожно-транспортных происшествий с наездом на пешеходов  
Fig. 8. Average monthly number of traffic accidents involving pedestrians

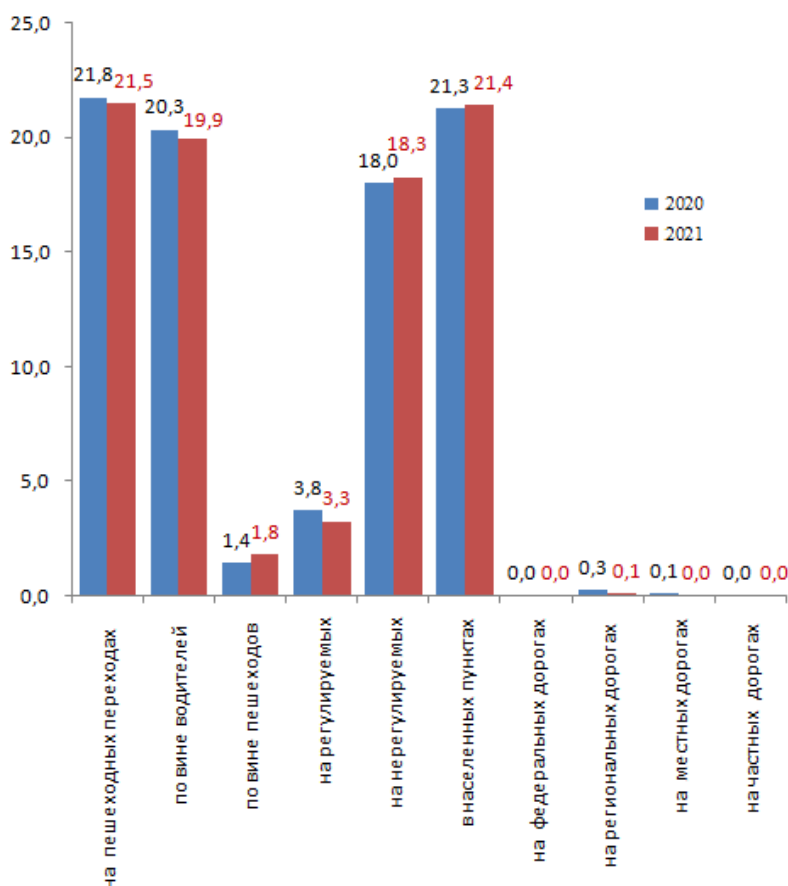


Рис. 9. Среднемесячное число дорожно-транспортных происшествий, совершаемых на пешеходных переходах  
Fig. 9. Average monthly number of road transport accidents on pedestrian transitions crossings

вине водителей ТС, 2 % – по вине пешеходов. В темное время суток совершается 36,6 % таких ДТП. На 1-й полосе движения 25,2 % ДТП произошло с участием пешеходов, на 2-й – 7,6 %. На нерегулируемых переходах ДТП случаются в 6 раз чаще. Порядка 21,4 % ДТП реализуются на пешеходных переходах в населенных пунктах. В пятницу случается больше всего ДТП

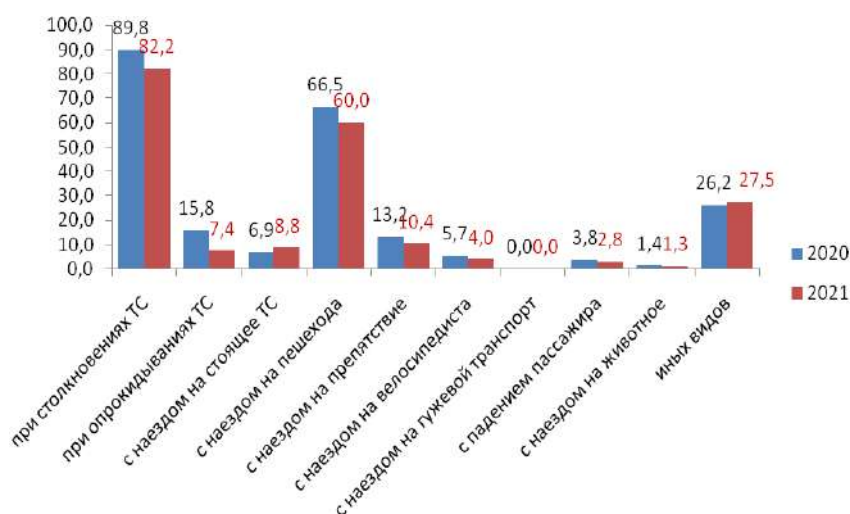
при участии пешеходов.

Плачевная ситуация в ИО с ДТП с участием несовершеннолетних (табл. 2). Наблюдается существенный рост таких ДТП и число пострадавших, причем в 54,8 % страдают дети-пассажиры. Сократились ДТП, в которых были нарушены правила перевозки детей и с пешеходами-детьми.

**Таблица 2.** Абсолютные значения показателей дорожно-транспортных происшествий с участием подростков

**Table 2.** Absolute values of indicators of road accidents involving teenagers

Показатель	2020	Аналогичный показатель прошлого года, %	2021	Аналогичный показатель прошлого года, %
ДТП с детьми до 16 лет	26	-23,5	31	19,2
Погибло	0	-100	1	100
Ранено	27	-18,2	33	22,2
Из них дети-пассажиры	11	-15,4	17	54,5
Погибло	0	-100	0	0
Ранено	11	-15,4	20	81,8
Из них дети до 12 лет	7	-22,2	12	71,4
Погибло	0	-100	0	0
Ранено	7	-22,2	14	100
Нарушение правил перевозки детей	4	100	1	-75,5
Погибло	0	-100	0	0
Ранено	4	100	1	-75,5
Дети-пешеходы	15	-28,6	14	-6,7
Погибло	0	-100	1	100
Ранено	16	-20,0	13	-18,8
ДТП с участием подростков до 18 лет	35	-12,5	39	11,4
Погибло	1	0	1	0
Ранено	36	-10	42	16,7
Из них из-за нарушения водителями ПДД	28	-12,5	34	21,4
Погибло	1	0	1	0
Ранено	29	-9,4	37	27,6

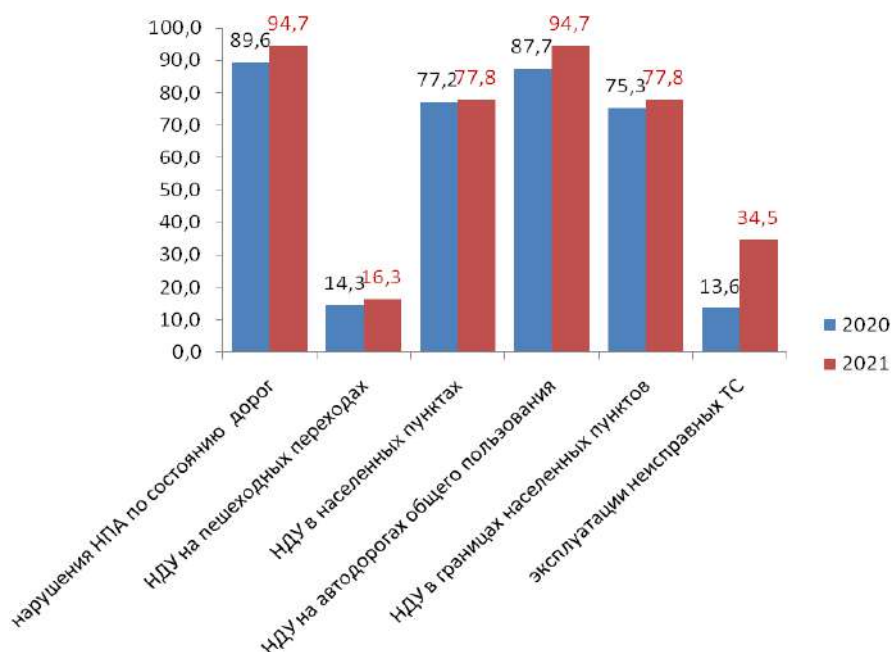


**Рис. 10.** Гистограмма численности дорожно-транспортных происшествий по причинам их реализации  
**Fig. 10.** Histogram of the number of road accidents by reasons for their cause

В 2021 г. подавляющее число ДТП (40,2 %) произошло по двум причинам: столкновение – 41,62 % (39,49 % погибших и 48,28 % раненых); наезд ТС на пешехода – 29,35 % ДТП (26,43 % погибших и 22,17 % раненых). Полученные данные согласуются с [24]. Такие же основные причины ДТП были в 2020 г. Участились в 1,26 раза случаи наезда на

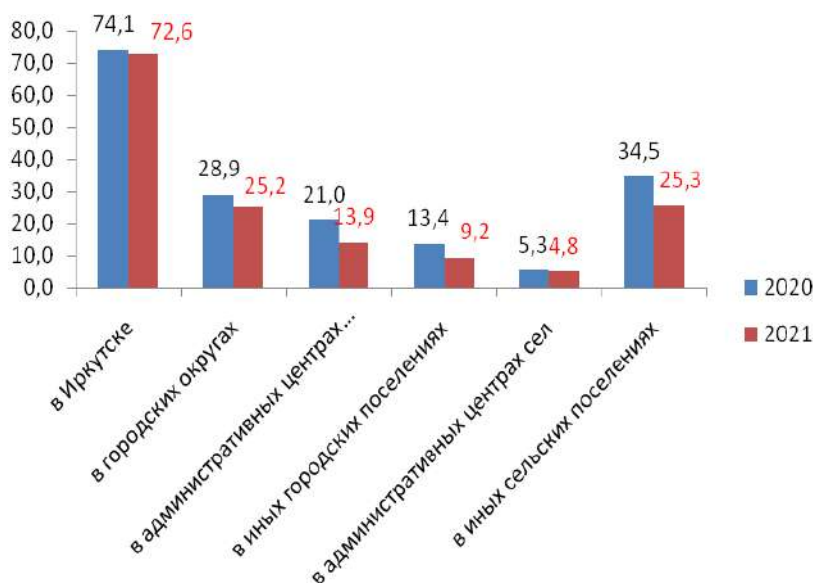
стоящее ТС (АППГ – 26,5 %).

Много ДТП в РФ [25] и ИО [26] происходит из-за ненадлежащего состояния автодорог. Так, в ИО только 70,8 % федеральных и 30,2 % региональных автодорог удовлетворяют требованиям нормативно-правовых актов (НПА) [18, 27]. На рис. 11 показано распределение числа ДТП, произошедших из-за нарушения требова-



**Рис. 11.** Распределение среднеемического числа транспортных происшествий из-за нарушения требований нормативно-правовых актов и неудовлетворительных дорожных условий

**Fig. 11.** Distribution of the average monthly number of traffic accidents due to violation requirements of regulatory legal acts and poor road conditions



**Рис. 12.** Распределение численности дорожно-транспортных происшествий по месту их реализации

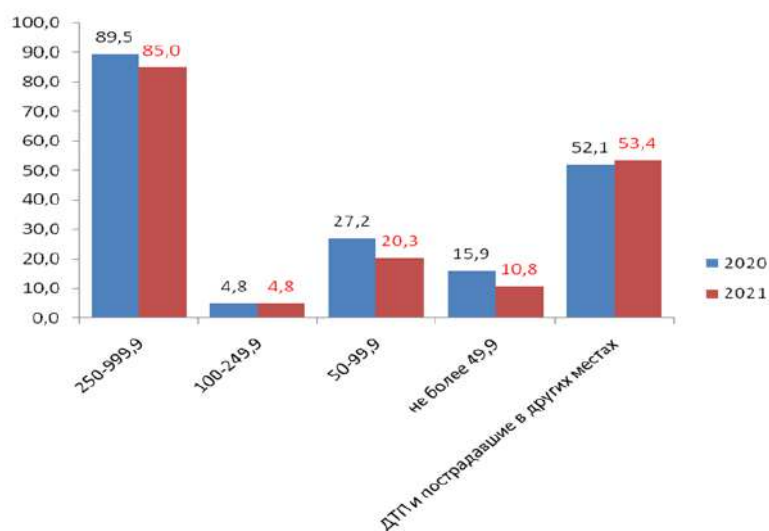
**Fig. 12.** Distribution of the number of road accidents by the location

ний НПА и неудовлетворительных дорожных условий (НДУ).

Число ДТП из-за нарушения требований НПА и НДУ в 2021 г. выросло в 1,06 раз, эксплуатации неисправных ТС – в 2,54 раза. На рис. 12 показано распределение ДТП по месту события.

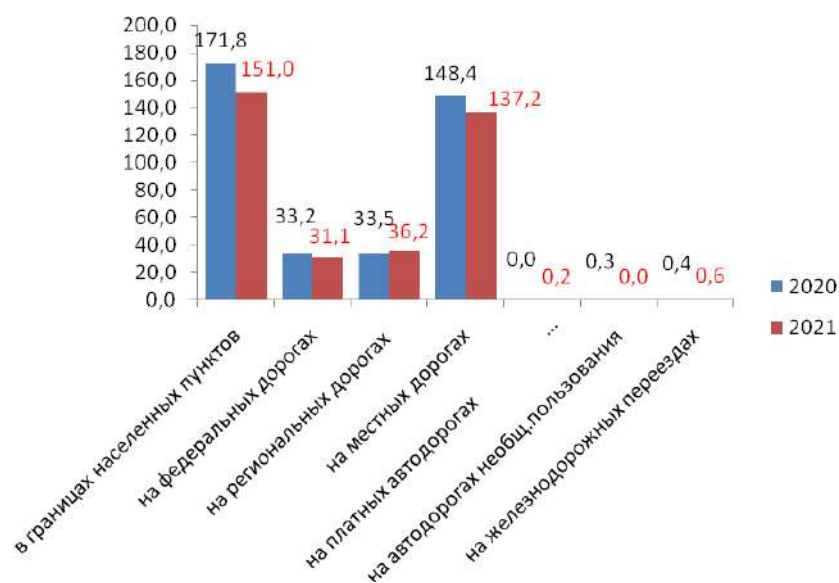
В Иркутске реализуется 48,07 % всех ДТП ИО. Распределение среднемесячной численности ДТП по числу жителей населенных пунктов, тыс. чел. представлено на рис. 13.

Из рис. 13 видна положительная динамика снижения числа ДТП в 2021 г. В 11,5 % случаях ТС скрывались с места ДТП, в 3,6 % – исчезал только водитель ТС. В 3,7 % – владелец ТС не был установлен. На рис. 14 представлено распределение численности ДТП по дорогам ИО общего пользования. Порядка 15,20 % ДТП происходит на федеральных дорогах, 17,69 % – на региональных, 67,10 % – на местных, 0,08 % – на платных. Причем 73,87 % ДТП реализуется в границах населенных пунктов.



**Рис. 13.** Среднемесячная численность дорожно-транспортных происшествий по числу жителей населенных пунктов, тыс. человек

**Fig. 13.** Average monthly number of road traffic accidents by number of settlements residents, thousand people



**Рис. 14.** Распределение численности дорожно-транспортных происшествий по дорогам Иркутской области

**Fig. 14.** Distribution of the number of accidents by Irkutsk public roads

**Таблица 3.** Показатели дорожно-транспортных происшествий за 2021 г. для транспорта общего пользования**Table 3.** Road transport indicators accidents for 2021 for public transport

Вид транспортного средства. Type of transport	Количество дорожно-транспортных происшествий. Number of road accidents	Аналогичный показатель прошлого года, %. Same indicator for previous year,%	Погибло Dead	Аналогичный показатель прошлого года, % Same indicator for previous year,%	Ранено Injured	Аналогичный показатель прошлого года, % Same indicator for previous year,%
Автобус. Bus	80	-15,8	11	450	116	-17,7
Транспорт по заказу. Charter transport	3	-40	0	-100	3	-87,0
Автобус пригородный. Shuttle bus	5	-54,6	0	0	8	-65,2
Автобус пригородный (заказ) Shuttle bus (charter)	1	100	4	∞	2	-87,5
Междугородный регулярный. Intercity coach	5	-33,0	6	∞	7	∞
Троллейбус. Trolley bus	11	10	1	∞	13	1200
Трамвай. Tram	10	-9,1	0	-100	12	-20,0

Показатели ДТП для транспорта общего пользования за 2021 г. указаны в табл. 3. В транспорте общего пользования больше всего ДТП происходит в автобусах с наибольшим числом погибших и раненых пассажиров и водителей. ДТП чаще происходит в троллейбусе, чем в трамвае. В 2021 г. существенно возросло число погибших в заказанных пригородных и междугородних автобусах при ДТП (АППГ = ∞, так как в 2020 г. не было погибших в ДТП).

### Заключение

Количественный анализ данных по уже произошедшим ДТП – основа успешной работы по повышению безопасности дорожного движения. Учет динамики изменения показателей аварийности позволит выбрать профилактические мероприятия и повысить их эффективность [15]. На основании результатов анализа можно пред-

ложить ряд первоочередных мероприятий.

Учитывая, что на г. Иркутск приходится практически половина ДТП, происходящих в области, следует проверить выполнение стандартов по оборудованию перекрестков, пешеходных переходов и расчету параметров светофорного регулирования.

Требуется оснастить автобусы алкоблоkirаторами, не позволяющими запустить двигатель ТС, если в выдохе водителя есть пары алкоголя [28]. Для исключения ДТП из-за усталости водителя снабдить ТС устройством дистанционного отслеживания поведения век, глаз и зрачков [29].

Довести состояние федеральных, региональных дорог до нормативных требований. Разработать профилактические мероприятия «Ребенок – главный пассажир» [30].

### Список литературы

1. Число погибших в ДТП сократилось в 2020 году на 5%, число раненых – на 13% // Демоскоп Weekly. 2021. № 899–900. URL: <http://www.demoscope.ru/weekly/2021/0899/barom03.php> (Дата обращения: 15.01.2022).
2. Фаттахов Т.А. Дорожно-транспортные происшествия и смертность в России: 1956-2012 // Демографическое обозрение. 2015. Т. 2. № 2. С. 6–36.
3. Матросова Л.Д., Семенов Е.Ю. Прогнозирование показателей безопасности дорожного движения на основе статистического анализа // Среднерусский вестник общественных наук. 2016. Т. 11. № 3. С. 55–59.
4. Проблема высокого уровня аварийности на автомобильных дорогах мира // Крудор : офиц. сайт краевого гос. казенного учреждения «Управление автомобильных дорог по Красноярскому краю» URL: <https://krudor.ru/news/> (Дата обращения: 14.04.2022).
5. В России стало больше автомобилей, но меньше смертельных ДТП // RAEX Rating Review : сайт. URL: [https://raex-rr.com/auto/car\\_accidents](https://raex-rr.com/auto/car_accidents) (Дата обращения: 24.04.2022).

6. Тяжесть последствий ДТП определение // Справочник водителя : сайт. URL: <https://ukstrela.com/tyazhest-posledstviy-dtp-opredelenie/> (Дата обращения: 11.04.2022).
7. 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).
8. Анализа детского дорожно-транспортного травматизма на территории Воронежской области / И.Н. Банин, Т.А. Бережнова, Я.В. Кулинцова и др. // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. Т. 13. № 2. С. 326–328.
9. Карева В.В., Карева Д.А. Системный подход к проведению профилактической работы по снижению детского дорожно-транспортного травматизма // Автомобильный транспорт Дальнего востока. 2018. № 1. С. 143–148.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Хабибуллин Д.Р., Ильдарханов Р.Ф. Современные проблемы безопасности дорожного движения // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XII Национ. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Тюмень, 2019. Т. 2. С. 101–108.
14. Повышение безопасности движения автомобилей на основе анализа аварийности и моделирования ДТП / В.А. Корчагин, С.А. Ляпин, В.Э. Клявин и др. // Фундаментальные исследования. 2015. № 6-2. С. 251–256.
15. Аземша С.А., Карасевич С. Н. Учет динамики аварийности при разработке мероприятий по повышению безопасности дорожного движения // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XII Национ. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Тюмень : Изд-во ТИУ, 2019. Т. 2. С. 8–14.
16. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения // Госавтоинспекция : офиц. сайт Министерства внутренних дел Рос. Федерации. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (Дата обращения: 21.03.2022).
17. 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.
18. Асламова В.С., Кузнецова П.А., Асламов А.А. Сравнительный анализ дорожно-транспортных происшествий в Иркутской области и России // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2021. № 15. С. 127 – 130.
19. 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.
20. Фаттахов Т.А. Дорожно-транспортный травматизм в России и его факторы // Социальные аспекты здоровья населения : электрон. журн. 2015. № 4 (44). URL: [http://vestnik.mednet.ru/content/view/695/30/lang\\_ru\\_cp1251/](http://vestnik.mednet.ru/content/view/695/30/lang_ru_cp1251/) (Дата обращения: 10.04.2022).
21. 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).
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. Проблемы безопасности на автомобильном транспорте и пути ее снижения / В.С. Шкрабак, П.П. Григоров, Р.В. Шкрабак и др. // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. № 3. С. 99–102.
24. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 году». М. : МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2021. 264 с.
25. Соколова Е.В., Степанов П.С. Конкуренция как фактор повышения качества автомобильных дорог // Современная конкуренция. 2019. Т. 13. № 2 (74). С. 81–94.
26. Каждое пятое ДТП зимой в Иркутской области происходит из-за плохого содержания дорог // Ирк.ру : информац. сайт Иркут. обл. URL: <https://www.irk.ru/news/20170823/road/> (Дата обращения: 10.04.2022).
27. 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: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/c8e/c8e8afe3c8e348dc67f36bd6e24bf5c8.pdf> (Дата обращения: 18.10.2021).
28. Зейналов Ф.Н. К вопросу реализации основных направлений Стратегии безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018 - 2024 годы // Право и политика. 2019. № 10. С. 40–58.
29. Попов А.В., Суркаев А.Л., Моисеев Ю.И. К вопросу о диагностировании состояния утомления водителя транспортного средства // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XII Национ. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Тюмень : Изд-во ТИУ, 2019. Т. 2. С. 175–182.
30. Системный подход к дорожной безопасности // МВД Медиа : сайт. URL: <https://mvdmedia.ru/publications/police-of-russia/Competently/sistemnyu-podkhod-k-dorozhnoy-bezopasnosti/> (Дата обращения: 10.02.2022).

## References

1. Chislo pogibshikh v DTP sokratilos' v 2020 godu na 5%, chislo ranenyykh – na 13% (Elektronnyi resurs) [The number of deaths in road accidents decreased by 5% in 2020, the number of injured – by 13% (Electronic resource)]. Available at: (Accessed January 15, 2022).



2. Fattakhov T.A. Dorozhno-transportnye proisshestviya i smertnost' v Rossii: 1956 – 2012 [Road traffic accidents and mortality in Russia: 1956-2012]. *Demograficheskoye obobreniye* [Demographic overview], 2015, vol. 2, no. 2, pp. 6 – 36.
3. Matrosova L.D., Semenov E. Yu. Prognozirovaniye pokazatelei bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na osnove statisticheskogo analiza [Forecasting road safety indicators based on statistical analysis]. *Srednerusskii vestnik obshchestvennykh nauk* [Central Russian Bulletin of Social Sciences], 2016, vol. 11, no. 3, pp. 55 – 59.
4. Problema vysokogo urovnya avariinosti na avtomobil'nykh dorogakh mira (Elektronnyi resurs) [The problem of a high level of accidents on the world's highways (Electronic resource)]. Available at: <https://krudor.ru/news/> (Accessed April 14, 2022).
5. V Rossii stalo bol'she avtomobilei, no men'she smertel'nykh DTP (Elektronnyi resurs) [There are more cars in Russia, but fewer fatal accidents (Electronic resource)]. Available at: [https://raex-rr.com/auto/car\\_accidents](https://raex-rr.com/auto/car_accidents) (Accessed April 24, 2022).
6. Tyazhest' posledstviy DTP opredelenie (Elektronnyi resurs) [Severity of the consequences of an accident definition (Electronic resource)]. Available at: [https://raex-rr.com/auto/car\\_accidents](https://raex-rr.com/auto/car_accidents) (Accessed April 24, 2022).
7. 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 Resource)]. Available at: <https://www.irk.ru/news/20201109/crash/> (date access 12.09.2021). (Accessed December 9, 2021).
8. Banin I.N., Berezhnova T.A., Kulintsova Ya.V., Enin A.V. Analiz detskogo dorozhno-transportnogo travmatizma na territorii Voronezhskoi oblasti [Analysis of children's road traffic injuries in the territory of the Voronezh region]. *Sistemnyi analiz i upravleniye v biomeditsinskikh sistemakh* [System analysis and management in biomedical systems], 2014, vol. 13, no. 2, pp. 326 – 328.
9. Kareva V.V., Kareva D.A. Sistemnyi podkhod k provedeniyu profilakticheskoi raboty po snizheniyu detskogo dorozhno-transportnogo travmatizma [A systematic approach to carrying out preventive work to reduce children's road traffic injuries]. *Avtomobil'nyi transport Dal'nego vostoka* [Automobile transport of the Far East], 2018, no. 1, pp. 143 – 148.
10. 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 Vserossiyskoi 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.
11. Aslamova V.S., Minko A.A., Aslamov A.A. Prognozyne modeli travmatizma s uchastiem podrostkov na avtomobil'nykh dorogakh obshchego 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.
12. Minko A.A., Aslamova V.S. Sravnitel'nyi 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.
13. Khabibullin D.R., Ildarkhanov R.F. Sovremennyye problemy bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Modern problems of 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, 2019, vol.2, pp. 101 – 108.
14. Korchagin V.A., Lyapin S.A., Klyavin V.E., Sitnikov V.V. Povysheniye bezopasnosti dvizheniya avtomobilei na osnove analiza avariinosti i modelirovaniya DTP [Improving the safety of car traffic based on the analysis of accidents and modeling of accidents]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2015, no. 6-2, pp. 251 – 256.
15. 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, 2019, vol. 2, pp. 8–14.
16. Svedeniya o pokazatelyakh sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya (Elektronnyi resurs) [Information about road safety indicators: website of the State Traffic Inspectorate (Electronic Resource)]. Available at: <http://stat.gibdd.ru/> (Accessed March 21, 2022).
17. 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 Vserossiyskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Ekologiya i bezopasnost' v tekhnosfere: sovremennyye 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.
18. Aslamova V.S., Kuznetsova P.A., Aslamov A.A. Sravnitel'nyi analiz dorozhno-transportnykh proisshestviy v Irkutskoi oblasti i Rossii [Comparative analysis of road traffic accidents in the Irkutsk region and Russia]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Angarsk State Technical University], 2021, no. 15, pp. 127 – 130.
19. P'yankova A.I., Fattahov T.A. Smertnost' ot dorozhno-transportnykh proisshestviy v Rossii: podkhody k otsenke, tendentsii i perspektivy [Mortality from road traffic accidents in Russia: approaches to assessment, trends and prospects]. *Demograficheskoye obobreniye* [Demographic Review], 2019, no. 6 (3), pp. 58 – 84.
20. Fattakhov T.A. Dorozhno-transportnyi travmatizm v Rossii i ego faktory [Road traffic injuries in Russia and its factors]. *Sotsial'nye aspekty zdorov'ya naseleniya* [Social aspects of public health], 2015, no. 4(44).
21. V Irkutskoi oblasti v 2020 godu 78 chelovek pogiblo po vine p'yanykh voditelei (Elektronnyi resurs) [In the Irkutsk region in 2020, 78 people died due to the fault of drunk drivers (Electronic Resource)]. Available at: <https://www.irk.ru/news/20201030/crash/> (Accessed October 10, 2021).
22. Chislo DTP snizilos' v 2020 godu na 16 % v Irkutskoi 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/> (Accessed October 10, 2021).

23. Shkrabak V.S., Grigorov P.P., Shkrabak R.V., Braginets Yu.N., Solov'eva V.P. Problemy bezopasnosti na avtomobil'nom transporte i puti ee snizheniya [Problems of safety in road transport and ways to reduce it]. *Izvestiya Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii* [Proceedings of the Samara State Agricultural Academy], 2013, no. 3, pp. 99 – 102.

24. Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii zashchity naseleniya i territoriy Rossiyskoy Federatsii ot chrezvychainykh situatsii prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera v 2020 godu» [State Report «On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2020»]. Moscow: VNII GOCHS (FTS) Publ., 2021. 264 p.

25. Sokolova E.V., Stepanov P.S. Konkurentsia kak faktor povysheniya kachestva avtomobil'nykh dorog [Competition as a factor in improving the quality of roads]. *Sovremennaya konkurentsia* [Modern competition], 2019, Vol. 13, no. 2 (74), pp. 81-94.

26. Kazhdoye pyatoe DTP zimoi v Irkutskoi oblasti proiskhodit iz-za plokhogo sodержaniya dorog (Elektronnyi resurs) [Every fifth accident in winter in the Irkutsk region occurs due to poor road maintenance (Electronic resource)]. Available at: <https://www.irk.ru/news/20170823/road/> (Accessed April 10, 2022).

27. Bogomolov V.N. Otchet o rezul'tatakh kontrol'nogo meropriyatiya «Proverka ispol'zovaniya byudzhetnykh assignovaniy, napravlenykh na sodержaniye avtomobil'nykh dorog obshchego pol'zovaniya federal'nogo, regional'nogo i mezhmunitsipal'nogo znacheniya v 2018 godu i istekshem periode 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 past period of 2019» (Electronic recourse)]. Available at: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/c8e/c8e8afe3c8e348dc67f36bd6e24bf5c8.pdf> (Accessed: October 18, 2021).

28. Zeinalov F.N. K voprosu realizatsii osnovnykh napravlenii Strategii bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v Rossiyskoi Federatsii na 2018 – 2024 gody [On the issue of implementing the main directions of the Road Safety Strategy in the Russian Federation for 2018 – 2024]. *Pravo i politika* [Law and Politics], 2019, no. 10, pp. 40 – 58.

29. Popov A.V., Surkayev A.L., Moiseev Yu. I. K voprosu o diagnostirovaniy sostoyaniya utomleniya voditelya transportnogo sredstva [On the issue of diagnosing the state of fatigue of a vehicle driver]. *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, 2019, vol. 2, pp. 175 – 182.

30. Sistemnyi podkhod k dorozhnoi bezopasnosti (Elektronnyi resurs) [A systematic approach to road safety (Electronic recourse)]. Available at: <https://mvdmedia.ru/publications/police-of-russia/Competentny/sistemnyy-podkhod-k-dorozhnoy-bezopasnosti/> (Accessed February 10, 2022).

#### Информация об авторах

**Асламова Вера Сергеевна**, д-р техн. наук, профессор кафедры техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [aslamovav@yandex.ru](mailto:aslamovav@yandex.ru).

**Кузнецова Полина Андреевна**, магистрант кафедры техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: [polina-kuznetsova-98@bk.ru](mailto:polina-kuznetsova-98@bk.ru).

**Асламов Александр Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры машин и аппаратов химических производств, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: [aaa\\_mx@angtu.ru](mailto:aaa_mx@angtu.ru).

#### Information about the authors

**Vera S. Aslamova**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Technosphere Safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [aslamovav@yandex.ru](mailto:aslamovav@yandex.ru).

**Polina A. Kuznetsova**, master's student of Department of Technosphere safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [polina-kuznetsova-98@bk.ru](mailto:polina-kuznetsova-98@bk.ru).

**Alexander A. Aslamov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Machines and Devices of Chemical Production, Angarsk State Technical University, Angarsk; e-mail: [aaa\\_mx@angtu.ru](mailto:aaa_mx@angtu.ru).

## Методы искусственного интеллекта в оценке степени износа футеровочной брони конусных дробилок

В.С. Великанов<sup>1</sup>✉, Н.В. Дёрина<sup>2</sup>, О.Р. Панфилова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>2</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация

✉rizhik\_00@mail.ru

### Резюме

Конусные дробилки среднего и мелкого дробления эксплуатируются на горнодобывающих предприятиях при дроблении материалов с достаточно широким диапазоном физико-механических свойств. Обзор и анализ научно-технической литературы по проблематике закономерностей процесса дробления в конусных дробилках определил следующие направления исследований: зависимости между гранулометрическим составом материала и параметрами профиля дробящего пространства; интенсивность изнашивания футеровочной брони подвижного и неподвижного конусов; установление оптимального профиля дробящего пространства; минимизация расхода высокомарганцевистой стали; оптимизация затрат на ремонт и обслуживание дробильного оборудования и др. Состояние футеровочной брони является одним из основных определяющих факторов в изменении качественно-количественных характеристик процесса мелкого дробления. Установлено, что значительное число отказов конусных дробилок (96 %) приводят к внеплановым ремонтам. Целью исследования является реализация нового подхода в мониторинге состояния футеровочной брони. В статье применялся комплексный подход, который включает в себя научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований по рассматриваемой проблематике. Методологическую основу исследований составляют теория нечеткой логики и нечетких множеств, а также методы системного анализа. Научная новизна работы заключается в реализации возможности использования методов искусственного интеллекта в оценке состояния футеровочной брони конусных дробилок. Определен подход в контроле износа футеровочной брони конусных дробилок мелкого и среднего дробления.

### Ключевые слова

полезные ископаемые, дробилка, футеровочная броня, износ, искусственный интеллект, моделирование, нейронная сеть

### Для цитирования

Великанов В.С. Методы искусственного интеллекта в оценке степени износа футеровочной брони конусных дробилок / В.С. Великанов, Н.В. Дёрина, О.Р. Панфилова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 202–211. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).202-211

### Информация о статье

поступила в редакцию: 7.06.2022 г.; поступила после рецензирования: 16.06.2022 г.; принята к публикации: 17.06.2022 г.

## Artificial Intelligence methods in assessing the degree of wear of the lining armor of cone crushers

V.S. Velikanov<sup>1</sup>✉, N.V. Derina<sup>2</sup>, O.R. Panfilova<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, the Russian Federation

✉rizhik\_00@mail.ru

### Abstract

Cone crushers of medium and fine crushing are operated at mining enterprises when crushing materials with a fairly wide range of physical and mechanical properties. A review and analysis of the scientific and technical literature on the problems of the regularities in the crushing process in cone crushers determined the following areas of research: the dependencies between the granulometric composition of the material and the parameters of the profile of the crushing space; the intensity of the lining armor wear of movable and stationary cones; establishing the optimal profile of the crushing space; minimizing the consumption of high-manganese steel, optimizing the repair and maintenance costs of crushing equipment, etc. The condition of the lining armor is one of the main determining factors in changing the qualitative and quantitative characteristics of the fine crushing process. It is established that a significant number of failures of cone crushers, namely 96 %, lead to unscheduled repairs. The aim of the study is to implement a new approach in monitoring the condition of lining armor. The article uses an integrated approach, which includes scientific analysis and generalization of previously published studies on the subject under consideration. The methodological basis of the research is the theory of fuzzy logic and fuzzy sets, as well as methods of system analysis. The scientific novelty of the work lies in the realization of the possibility of using artificial intelligence methods in assessing the condition of the

lining armor of cone crushers. An approach to the control of the lining armor wear of cone crushers of fine and medium crushing is determined.

### Keywords

minerals, crusher, lining armor, wear, artificial intelligence, modeling, neural network

### For citation

Velikanov V.S., Derina N.V., Panfilova O.R. Metody iskusstvennogo intellekta v otsenke stepeni iznosa futerovochnoi broni konusnykh drobilok [Artificial intelligence methods in assessing the degree of wear of the lining armor of cone crushers]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 202–211. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).202-211

### Article Info

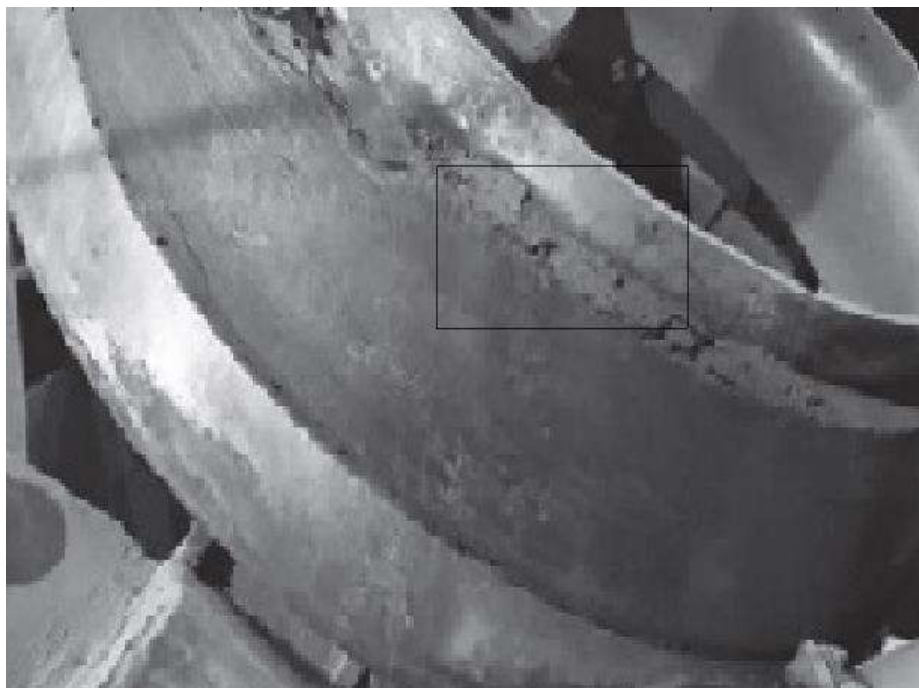
Received: June 7, 2022; revised: June 16, 2022; accepted: June 17, 2022.

### Введение

Эксплуатация технологического оборудования в условиях горно-перерабатывающих предприятий осуществляется при воздействии факторов различной природы, обусловленных конструктивными и функциональными особенностями горного оборудования (условиями эксплуатации) и случайными внешними воздействиями, которые приводят к изменениям его технического состояния. К самым характерным следует отнести нагрузки от механического и термического воздействия, параметры прочности материала, геометрические размеры, уровень технического обслуживания, ремонта и др. Эти факторы приводят к постепенному ухудшению технического состояния горного оборудования во времени.

Статистика по вынужденным остановкам дробилок составляет порядка 16–20 % их фонда рабочего времени, простои обусловлены необходимостью замены физически изношенных деталей. Коэффициент использования дробильного оборудования в среднем на отечественных горно-перерабатывающих предприятиях составляет 0,75–0,86 % [1–4].

Исследования показывают, что футеровочные брони дробилок среднего (КСД) и мелкого (КМД) типов дробления являются наименее износостойкими (рис.1). Стоимость этих деталей от общего объема затрат на ремонтно-эксплуатационные нужды составляет 91 % для дробилок типа КСД и 80 % для дробилок типа КМД.



**Рис. 1.** Характерный износ футеровочной брони дробилок среднего и мелкого типов дробления  
**Fig. 1.** Typical wear of lining armor in medium and fine type crushers

Интенсивное изнашивание футеровочной брони приводит к изменению размеров разгрузочной щели в сторону увеличения, что в конечном итоге приводит к укрупнению дробленого продукта, что отрицательно влияет на качественно-количественные характеристики процесса дробления. Причем футеровочные брони дробилок среднего и мелкого дробления, образующие камеру дробления, изнашиваются неравномерно, что приводит к ускоренному изменению зазоров между дробящими поверхностями по всей глубине камеры дробления [5].

## Материалы и методы

Для решения задач прогнозирования технического состояния и оценки остаточного ресурса промышленного оборудования различными исследователями предложено множество моделей, описывающих процесс возникновения отказа оборудования, которые отличаются видом исходной информации, методами ее анализа и формой представления результатов [6, 7]. В соответствии с наиболее общей классификацией их можно разделить на подходы, представленные (табл. 1).

Процессы, происходящие в камере дроб-

**Таблица 1.** Модели, описывающие процесс возникновения отказов технологического оборудования  
**Table 1.** Models describing the process of technological equipment failures

Модели	Достоинства	Недостатки
На физических моделях (physical-based methods) <b>PhM</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Использует известные математические модели для описания физических, химических и иных процессов износа конструкций.</li> <li>Процесс основан на отработанной процедуре построения необходимых математических моделей систем.</li> <li>Создание точной физической модели требует глубокого понимания того, как работает конкретная система и механизм отказов</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Точность этих моделей сильно зависит от понимания системы [8].</li> <li>Реализация зачастую невозможна в рамках реального производственного процесса [9].</li> <li>Использование чисто физических методов оценки остаточного ресурса не позволяет учесть многообразие реальных условий эксплуатации</li> </ol>
На использовании формализованных знаний (knowledge-based methods) <b>КВМ</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Использует опыт и знания экспертов для решения задач поддержки принятия решений [10]. Примеры методов, относящихся к этим классам, являются экспертные системы и системы на основе нечеткой логики [11].</li> <li>Нечеткая логика как механизм представления знаний широко применяется во многих технических приложениях [12, 13].</li> <li>Используется несколько «уровней» определенности в дополнение к обычным «истина» и «ложь». Полезны для описания процессов и состояний системы в формате лингвистических переменных, которые по своей сути нечеткие и включают в себя качественные описания числовых значений, значимых для операторов</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Экспертные системы не могут принимать правильные решения в ситуациях, не включенных в базу знаний, на которой она была обучена, и получение такой базы знаний само по себе является проблемой.</li> <li>Знания экспертов трудно формализовать, и они зачастую связаны с неопределенностями.</li> <li>Увеличение числа решающих правил приводит к требованиям в плане увеличения вычислительной мощности.</li> <li>Реализация моделей на основе экспертных знаний для сложных систем, определение правильного набора правил и функций отношений является сложным и трудоемким процессом</li> </ol>
на анализе данных (data-driven methods) <b>DDM</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Моделирует поведение исследуемой системы на основе данных, собранных в процессе мониторинга.</li> <li>Обладает наибольшим потенциалом и практической эффективностью, которая продолжает наращиваться на базе использования статистических методов анализа многомерных данных, и методов машинного обучения [14].</li> <li>Обладает свойствами универсальности, поскольку они абстрагированы от физической природы системы, не требует глубоких априорных знаний ее внутренней структуры и функциональных связей между элементами [6]</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Относительно дороги для более сложных инженерных моделей. Необходимо откалибровать с помощью данных на месте. Сами по себе они не очень хороши для оценки побочного эффекта.</li> <li>Предположения должны быть подтверждены исследованиями и другими измеренными данными. Ограниченная применимость</li> </ol>

ления, и остаточный ресурс футеровочной брони конусных дробилок достаточно трудно описать и представить с помощью аналитических выражений, так как большинство влияющих факторов носят случайный характер. Поэтому имеется необходимость в новом подходе, учитывающем неопределенный характер взаимодействия дробимого материала с броней подвижного и неподвижного конуса.

Использование формализованных знаний, а именно математического аппарата теории нечеткой логики (НЛ) и нечетких множеств в силу того, что возможности данной теории позволяют преодолевать трудности, связанные с качественным характером, а также неполнотой и расплывчатостью информации, успешно реализовано авторами в разработанной системе снижения рисков отказов при управлении горной машиной [15]. В рамках выполнения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы создана система автоматического управления по контролю величины зазора выходной щели конусной дробилки типа КМД-1750Гр-Д на основе методов нечеткого управления. В качестве регулятора ширины разгрузочной щели применен нечеткий регулятор (НР). На вход НР подается два управляющего

сигнала – состояние футеровочной брони и выход класса крупнее требуемого максимального куска, а на выходе соответственно ширина разгрузочной щели.

В развитии дальнейших исследований за основу принятой методологии выбран оригинальный подход, реализованный коллективом авторов в ряде научно-исследовательских работ, а именно применение методов искусственного интеллекта, в том числе нечетких нейронных сетей (ННС) для решения задач прогнозирования вероятности отказов горного оборудования [16–19]. ННС могут создавать высокоадаптивные нелинейные прогнозные модели, позволяющие во многих случаях моделировать и выполнять прогнозы сложных временных зависимостей с большей эффективностью и точностью по сравнению с известными статистическими методами.

Основная идея, положенная в основу ННС следующая: используется выборка данных для определения параметров функций принадлежности, которые лучше всего соответствуют некоторой системе логического вывода, т. е. выводы делаются на основе аппарата нечеткой логики, а для нахождения параметров функций принадлежности используются алго-



Рис. 2. Структура нечетких нейронных сетей

Fig. 2. Structure of fuzzy neural networks

ритмы обучения нейронных сетей. Такие системы могут использовать заранее известную информацию, обучаться, приобретать новые знания, прогнозировать временные ряды, выполнять классификацию образов и, кроме этого, они являются вполне наглядными для пользователя [19] (рис. 2).

Процесс прогнозирования с помощью нейронных сетей состоит из следующих этапов:

- выбор типа нейронной сети;
- сбор и анализ входных обучающих данных;
- обучение нейронной сети (создание базы правил);
- тестирование на контрольном множестве данных и при необходимости доработка базы.

ННС объединяют достоинства нейронных сетей и систем нечеткого вывода [19].

### Полученные результаты и их обсуждение

Развитие теории и практики создания конусных дробилок позволило исследователям установить определенные зависимости в характеристиках конусных дробилок. Размер и форма конуса дробления, количество и характер подаваемого продукта, мощность установленного электродвигателя и другие параметры оборудования – все это учтено в конструкторских решениях современных отечественных дробилок. Помимо конструкции конусных дробилок на показатели их эффективной работы влияет множество разнородных факторов. В общем случае, классификация основных факторов, определяющих эффективность функционирования конусных дробилок, – задача достаточно сложная. Эксплуатация дробилок в условиях горно-перерабатывающих предприятий

определяется не только конструктивными и функциональными особенностями дробилок, но и рядом внешних факторов.

Процесс оценки степени износа футеровочной брони ( $Det_j$ ) может быть представлен следующей обобщенной информационной структурой:

$$Det_j \langle Ti, Ki, Ci; A \rightarrow B \rangle,$$

где  $Det_j$  – возможные состояния футеровочной брони;  $T_i$  – множество значений технических факторов;  $K_i$  – множество значений внешних факторов;  $C_i$  – множество значений текущих характеристик;  $i$  – количество элементов каждого фактора;  $j$  – количество возможных состояний футеровочной брони;  $A, B$  – нечеткие высказывания;  $A \rightarrow B$  – нечеткая импликация.

Нейронная сеть состоит из: входного слоя – синапсов, связывающих входы нейрона с ядром; ядра нейрона, которое осуществляет обработку этих сигналов; аксона, который связывает нейрон с нейронами следующего слоя и выходного слоя (рис. 3).

Входным слоем оценки степени износа футеровочной брони являются факторы и текущие характеристики  $T_i, K_i, C_i$  (соответственно с предложенным подходом): чем более неопределен фактор, влияющий на степень износа, тем, в конечном итоге, и процесс оценки более нечеткий. Поэтому с использованием основных положений теории НЛ данные должны быть представлены в виде функций принадлежности. Данный этап называется фазификацией. Она представляет собой процедуру нахождения значений функций принадлежности входных лингвистических переменных на основе обычных (не нечетких) исходных данных [20–22]. Для построения модели оценки степени износа футеровочной брони необходи-

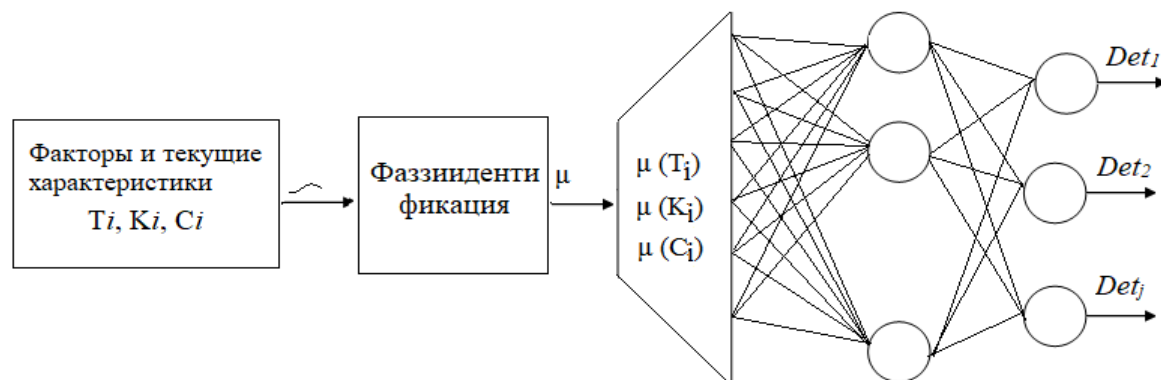


Рис.3. Схема нейронной сети  
Fig. 3. Scheme of neural network

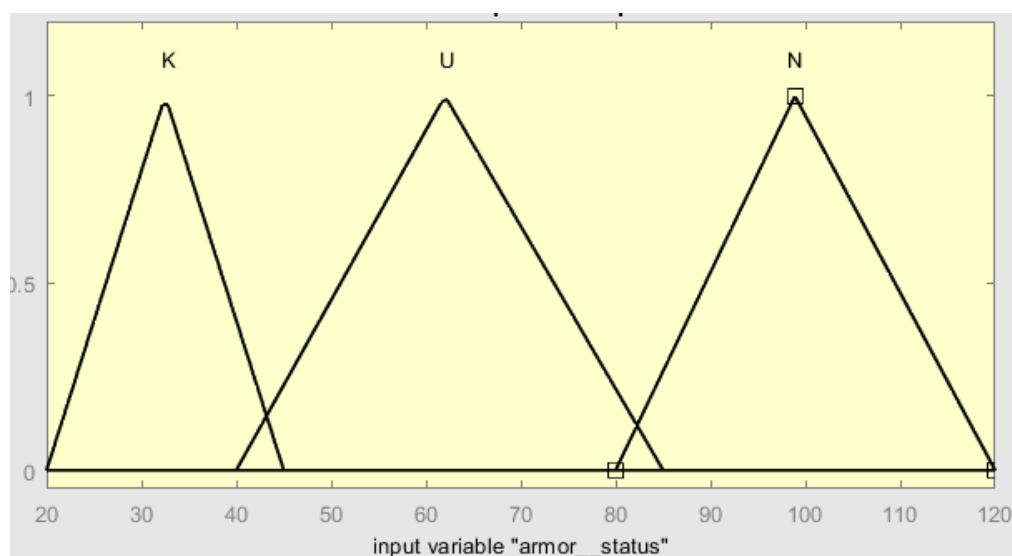
мо определить функции принадлежности каждого фактора  $\mu(T_i)$ ,  $\mu(K_i)$ , и  $\mu(C_i)$ , а также построить нечеткую базу правил.

Для фаззиидентификации привлекаются эксперты (10 чел., средний опыт работы 27,4 года). Экспертными методами определены терм-множества и функции принадлежности всех лингвистических переменных (табл. 2).

Составление набора правил нечеткого логического вывода осуществляется также с привлечением экспертов. Он реализуется в программном пакете MatLab. Данный пакет является удобным инструментом разработки сложных нейронных систем и предоставляет удобную среду для синтеза нейросетевых методик с прочими методами обработки данных (wavelet-анализ, ста-

**Таблица 2.** Формализация нечетких лингвистических переменных  
**Table 2.** Formalization of fuzzy linguistic variables

Наименование нечеткой переменной	Область определения	Терм-множества	Область определения терм-множества
<Степень износа брони>, мм	[120;20]	<Нормальная>=Н (состояние футеровочной брони в начальный момент эксплуатации)	[120;80]
		<Удовлетворительная>=У	[85;40]
		<Критическая>=К	[45;20]
<Ширина разгрузочной щели>, мм	[9;20]	<Нормальная>=Н (зазор разгрузочной щели в соответствии с данными каталога продукции производителя дробилок)	[10;12]
		<Увеличенная>=У	[15;20]
		<Критически увеличенная>=КУ	[20;25]
<Выход класса крупнее требуемого максимального куска>, (%)	[0;50]	<Нормальный> (выход плюсового класса)	[0;10]
		<Удовлетворительный>	[5;15]
		<Неудовлетворительный>	[14;50]
<Крепость породы>	[0,3;20]	<Особо крепкая (весьма твердая)>	[18;20]
		<Крепкая (твердая)>	[15;18]
		<Средняя>	[10;15]
<Содержание влаги>, %	[5;100]	<Высокое>	[60;100]
		<Среднее>	[40;60]
		<Низкое>	[5;40]



**Рис. 4.** Состояние футеровочной брони

**Fig. 4.** Lining armor state



стика, финансовый анализ и т.д.). На рис. 4 и 5 показано графическое представление функций принадлежности входных нечетких переменных с использованием среды MatLab пакет Fuzzy Logic. Разработанные в системе MatLab приложения могут быть затем перетранслированы в C++ [23–27]. В пакете Fuzzy Logic Toolbox системы MatLab гибридные сети реализованы в форме адаптивных систем нейро-нечеткого вывода ANFIS. На рис. 6 представлена архитектура ANFIS-разработанной модели.

Составление правил нечеткого логического вывода осуществляется также с привлечением экспертов. В нашем случае данные правила имеют вид:

–  $R_1$ : если состояние футеровочной брони «N» и выход класса крупнее требуемого макси-

мального куска «N» то ширина разгрузочной щели «N»;

–  $R_n$ : если состояние футеровочной брони «S» и выход класса крупнее требуемого максимального куска «N», то ширина разгрузочной щели «enlarged».

Данный редактор позволяет создавать или загружать конкретную модель адаптивной ННС, выполнять ее обучение, визуализировать ее структуру, изменять и настраивать ее параметры, а также использовать настроенную сеть для получения результатов нечеткого вывода. Метод был разработан в начале 1990-х гг. К основному преимуществу метода можно отнести возможность интеграции принципов нейронных сетей с принципами НЛ. Вывод такой системы соответствует набору нечетких

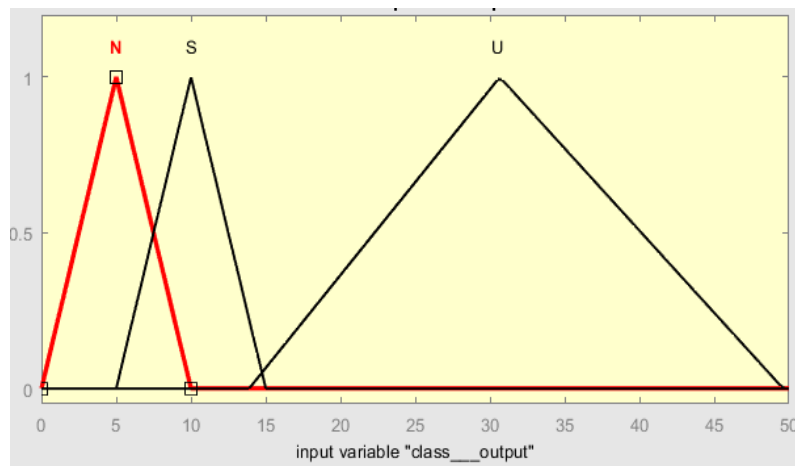


Рис. 5. Терм-множество входных параметров (выход класса крупнее требуемого максимального куска)

Fig. 5. Term set of input parameters (the output of the class is larger than the required maximum chunk)

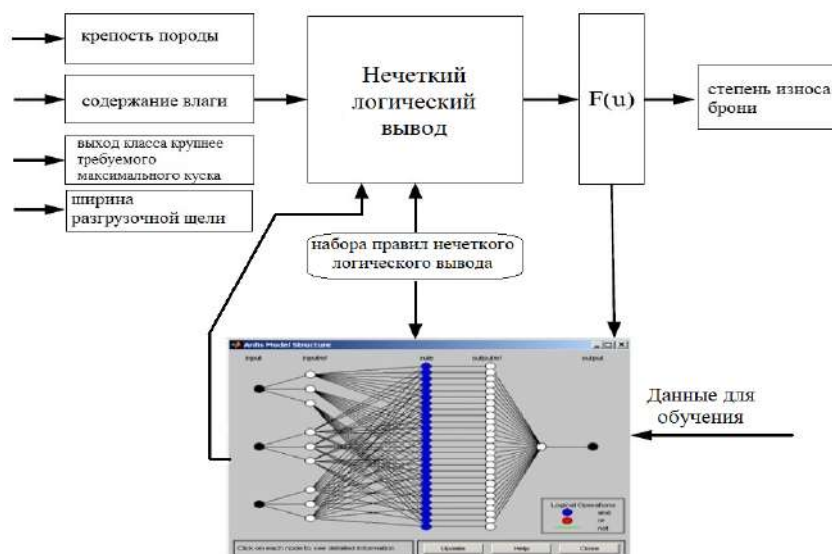


Рис. 6. Архитектура разработанной ANFIS-модели

Fig. 6. Architecture of a designed ANFIS-model

правил «если – то», которые имеют способность к обучению аппроксимированию нелинейных функций. Для наиболее эффективного и оптимального применения ANFIS можно использовать параметры, полученные с помощью генетического алгоритма.

### Заключение

В результате анализа последних научно-исследовательских работ и современного состояния дробильного оборудования в условиях отечественных горно-перерабатывающих производств установлено следующее:

1. Для горных предприятий приоритетными направлениями в области модернизации дробильного оборудования относительно конусных дробилок являются установление зави-

симостей между грансоставом материала и параметрами профиля дробящего пространства, а также интенсивность изнашивания футеровочной брони подвижного и неподвижного конуса.

2. В современных системах автоматического управления дробилками отсутствует возможность мониторинга и диагностики состояния футеровочной брони. Вопросы технической реализации данных систем недостаточно рассмотрены и практически не решены.

3. Реализация подходов на основе методов искусственного интеллекта в оценке степени износа футеровочной брони конусных дробилок позволяет воспроизводить сложные зависимости, на основе процессов, происходящих в камере дробления.

### Список литературы

1. Гончаров А.Б., Тулинов А.Б., Иванов В.А. Восстановление износа опорной чаши конусной дробилки // Горный информ.-аналит. бюл. 2016. № 9. С. 22–28.
2. Великанов В.С. Гуров М.Ю. Развитие научно-методологических основ совершенствования карьерных экскаваторов на базе нечетко-множественного подхода. Магнитогорск : МаГТУ им. Г.И. Носова, 2018. 217 с.
3. Бойко П.Ф. Оптимизация технического обслуживания и ремонта механического оборудования // Горный журнал. 2011. № 6. С. 52–54.
4. Мнацакян В.У., Бойко П.Ф. Технология восстановления работоспособности эксцентриковых стаканов дробильных агрегатов // Технология машиностроения. 2011. № 2. С. 38–39.
5. Управление обогащением медно-молибденовых руд на основе комплексного радиометрического анализа руды / З. Ганбаатар, Л. Дэлгэрбат, А.М. Дуда и др. // Плаксинские чтения : материалы междунар. конф. Екатеринбург, 2011. С. 118–121.
6. Равин А.А., Хруцкий О.В. Инженерные методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2018. № 1. С. 33–47.
7. Прогнозирование отказов оборудования в условиях малого количества поломок / Н.И. Шаханов, И.А. Варфоломеев, Е.В. Ершов и др. // Вестн. Череповецк. гос. ун-та. 2016. № 6 (75). С. 36–40.
8. Zhang L.A., Li X., Yu. J. A review of fault prognostics in condition based maintenance // Proc. of SPIE. 2006. P. 635–752. DOI: 10.1117/12.717514.
9. Ткаченко М.Г. Прогнозирование оставшегося времени безаварийной работы нефтегазодобывающего оборудования с применением технологии искусственных нейронных сетей // Инженерный вестник Дона : Электрон. науч. журн. 2014. № 4(1). С. 1–11. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2578> (дата обращения 18.02.2022).
10. Elattar H.M., Elminir H.K., Riad A.M. Prognostics: a literature review // Complex & Intelligent Systems. 2016. № 2 (2). P. 125–154. DOI: 10.1007/s40747-016-0019-3.
11. Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities / A. Heng, S. Zhang, A. Tan et al. // Mech. Systems and Signal Processing. 2008. Vol. 23(3). P. 724–739.
12. Шайхутдинов Д. В. Методы мониторинга и диагностики динамических сложных технических систем на базе средств имитационного моделирования // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 11 (1). С. 146–153.
13. Jardine K.S., Daming L., Dragan B. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. № 20(7). P. 1483–1510.
14. Тимофеев А.В., Денисов В.М. Идентификация стадии деградации оборудования в системах сервисного обслуживания превентивного типа // Науч.-техн. вестн. информ. технологий, механики и оптики. 2019. № 6. С. 1095–1104.
15. Великанов В.С. Научные основы системы снижения рисков отказов при управлении карьерным экскаватором : дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2020. 292 с.
16. Мажибрада И.Ю. Использование методов искусственного интеллекта в системах технического обслуживания и ремонта карьерного оборудования // Новая наука: проблемы и перспективы : материалы междунар. науч.-практ. конф. Стерлитамак, 2015. С. 111–115.
17. Мажибрада И.Ю. Экспертный анализ степени влияния факторов на возможность появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора // Горный информ.-аналит.бюл. 2017. № 9. С. 220–225.
18. Мажибрада И.Ю., Баранникова И.В., Бондаренко И.С. Анализ факторов, влияющих на возможность появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики : материалы XIII Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Т. 1. Тула, 2017. С. 162–167.

19. Мажибрада И.Ю. Разработка модели оценки эффективности управления системой технического обслуживания и ремонта одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 129 с.
20. Великанов В.С., Шабанов А.А. Метод анализа иерархий в установлении значений весовых коэффициентов эргономических показателей карьерных экскаваторов // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики : материалы VIII Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Тула, 2012. С. 238–244.
21. Великанов В.С. Разработка алгоритмов нечеткого моделирования для интеллектуальной поддержки принятия решений по определению уровня эргономичности карьерных экскаваторов // Горная промышленность. 2011. № 5 (99). С. 64–68.
22. Великанов В.С. Использование нечеткой логики и теории нечетких множеств для управления эргономическими показателями качества карьерных экскаваторов // Горный информ.-аналит. бюл. 2010. № 9. С. 57–62.
23. Бабокин Г.И., Шпрехер Д.М. Применение нейронных сетей для диагностики электромеханических систем // Горный информ.-аналит. бюл. 2011. № 4. С. 132–139.
24. Bearing fault diagnosis using multi-scale entropy and adaptive neuro-fuzzy inference / L. Zhang, G. Xiong, H. Liu et al. // Expert Systems with Applications. 2010. № 37. P. 6077–6085.
25. Machine health monitoring with LSTM networks / R. Zhao, J. Wang, R. Yan et al. // 10th International Conference on Sensing Technology (ICST). 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICSensT.2016.7796266.
26. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. 2015. Vol. 521. P. 436–444.
27. Созыкин А.В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер.: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т.6. № 3. С. 28–59.

### References

1. Goncharov A.B., Tulinov A.B., Ivanov V.A. Vosstanovlenie iznosa opornoj chashi konusnoi drobilki [Restoration of wear of the support bowl of a cone crusher]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], 2016, no. 9, pp. 22–28.
2. Velikanov V.S. Gurov M.Yu. Razvitiye nauchno-metodologicheskikh osnov sovershenstvovaniya kar'ernykh ekskavatorov na baze nechetko-mnozhestvennogo podkhoda [Development of scientific and methodological foundations for the improvement of quarry excavators on the basis of a non-clearly-multiple approach]. Magnitogorsk: MagGTU Publ., 2018. 217 p.
3. Boiko P.F. Optimizatsiya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta mekhanicheskogo oborudovaniya [Optimization of maintenance and repair of mechanical equipment]. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2011, no. 6, pp. 52–54.
4. Mnatsakanyan V.U., Boiko P.F. Tekhnologiya vosstanovleniya rabotosposobnosti eksentrikovykh stakanov drobil'nykh agregatov [Technology of restoring the operability of eccentric cups of crushing units]. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Technology of mechanical engineering], 2011, no. 2, pp. 38–39.
5. Ganbaatar Z., Dalgerbat L., Duda A.M. et al. Upravlenie obogashcheniem medno-molibdenovykh rud na osnove kompleksnogo radiometricheskogo analiza rudy [Controlling of enrichment of copper-molybdenum ores on the basis of complex radiometric analysis of ore]. *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii «Plaksinskie chteniya»* [Proceedings of the international conference «Plaksin readings»]. Ekaterinburg, 2011, pp. 118 – 121.
6. Ravin A.A., Khrutskii O.V. Inzhenernye metody prognozirovaniya ostatochnogo resursa oborudovaniya [Engineering methods for predicting the residual life of equipment]. *Vestnik AGTU. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of the Astrakhan' State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology], 2018, no. 1, pp. 33–47.
7. Shakhanov N.I., Varfolomeev I.A., Ershov E.V., Yudina O.V. Prognozirovaniye otkazov oborudovaniya v usloviyakh malogo kolichestva polomok [Forecasting equipment failures in conditions of a small number of breakdowns]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University], 2016, no. 6(75), pp. 36–40.
8. Zhang L.A., Li X., Yu. J. A review of fault prognostics in condition based maintenance // Proc. of SPIE. 2006. Pp. 635–752. DOI: 10.1117/12.717514.
9. Tkachenko M.G. Prognozirovaniye ostavshegosya vremeni bezavariinoi raboty neftegazodobyvayushchego oborudovaniya s primeneni-em tekhnologii iskusstvennykh neironnykh setei [Forecasting the remaining time of trouble-free operation of oil and gas production equipment with the use of artificial neural network technology]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Inzhenernyi vestnik Dona»* [Electronic scientific journal «Engineering Bulletin of the Don»], 2014, no. 4(1), pp. 1–11.
10. Elattar H.M., Elminir H.K., Riad A.M. Prognostics: a literature review // Complex & Intelligent Systems. 2016. No. 2 (2). Pp. 125–154. DOI: 10.1007/s40747-016-0019-3.
11. Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities / A. Heng, S. Zhang, A. Tan et al. // Mech. Systems and Signal Processing. 2008. Vol. 23(3). Pp. 724–739.
12. Shaikhutdinov D.V. Metody monitoringa i diagnostiki dinamicheskikh slozhnykh tekhnicheskikh sistem na baze sredstv imitatsionno-go modelirovaniya [Methods of monitoring and diagnostics of dynamic complex technical systems based on simulation modeling tools]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies], 2018, no. 11(1), pp. 146–153.
13. Jardine K.S., Daming L., Dragan B.A. review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. No. 20(7). Pp. 1483–1510.
14. Timofeev A.V., Denisov V.M. Identifikatsiya stadii degradatsii oborudovaniya v sistemakh servisnogo obsluzhivaniya preventivnogo tipa [Identification of the stage of equipment degradation in preventive maintenance systems]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2019, no. 6, pp. 1095–1104.

15. Velikanov V.S. Nauchnye osnovy sistemy snizheniya riskov otkazov pri upravlenii kar'ernym ekskavatorom [Scientific foundations of the system for reducing the risks of failures in the management of a quarry excavator]. Doctor's thesis. Ekaterinburg, 2020. 292 p.

16. Mazhibrada I.Yu. Ispol'zovanie metodov iskusstvennogo intellekta v sistemakh tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta kar'erno-go oborudovaniya [The use of artificial intelligence methods in systems of maintenance and repair of quarry equipment]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Novaya nauka: problemy i perspektivy»* [Proceedings of the International scientific and practical conference «New Science: problems and prospects»]. Sterlitamak, 2015, pp. 111–115.

17. Mazhibrada I.Yu. Ekspertnyi analiz stepeni vliyaniya faktorov na vozmozhnost' poyavleniya kategorii otkaza gidravlicheskoi sistemy odnokovshovogo kar'ernogo gidravlicheskogo ekskavatora [Expert analysis of the degree of influence of factors on the possibility of a category of failure of the hydraulic system of a single-bucket open-pit hydraulic excavator]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], 2017, no. 9, pp. 220–225.

18. Mazhibrada I.Yu., Barannikova I.V., Bondarenko I.S. Analiz faktorov, vliyayushchikh na vozmozhnost' poyavleniya kategorii otkaza gidravlicheskoi sistemy odnokovshovogo kar'ernogo gidravlicheskogo ekskavatora [Analysis of factors influencing the possibility of a category of failure of the hydraulic system of a single-bucket hydraulic excavator]. *Materialy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii po problemam gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki «Sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gor-noj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki» (V 2-kh tomakh)* [Proceedings of the XIII International Conference on Problems of Mining, Construction and Energy «Socio-economic and environmental problems of mining, construction and energy» (In 2 vol.)]. Tula, 2017, vol. 1, pp.162–167.

19. Mazhibrada I.Yu. Razrabotka modeli otsenki effektivnosti upravleniya sistemoi tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta odno-kovshovykh kar'ernykh gidravlicheskikh ekskavatorov [Development of a model for evaluating the effectiveness of management of the system of maintenance and repair of single-bucket quarry hydraulic excavators]. Ph. D's thesis. Moscow, 2018. 129 p.

20. Velikanov V.S., Shabanov A.A. Metod analiza ierarkhii v ustanovlenii znachenii vesovykh koeffitsientov ergonomicheskikh pokazatelei kar'ernykh ekskavatorov [Method of hierarchy analysis in determining the values of weight coefficients of ergonomic indicators of quarry excavators]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi konferentsiya po problemam gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki «Sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki»* [Proceedings of the VIII International Conference on problems of mining, construction and energy «Socio-economic and environmental problems of mining, construction and energy»]. Tula, 2012, pp. 238–244.

21. Velikanov V.S. Razrabotka algoritmov nechetkogo modelirovaniya dlya intellektual'noi podderzhki prinyatiya reshenii po opredeleniyu urovnya ergonomichnosti kar'ernykh ekskavatorov [Development of fuzzy modeling algorithms for intellectual decision-making support for determining the level of ergonomics of quarry excavators]. *Gornaya promyshlennost'* [Mining Industry], 2011, no. 5(99), pp. 64–68.

22. Velikanov V.S. Ispol'zovanie nechetkoi logiki i teorii nechetkikh mnozhestv dlya upravleniya ergonomicheskimi pokazatelyami kachestva kar'ernykh ekskavatorov [The use of fuzzy logic and the theory of fuzzy sets for the management of ergonomic quality indicators of quarry excavators]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining information and analytical Bulletin], 2010, no. 9, pp. 57–62.

23. Babokin G.I., Shprekher D.M. Primenenie neironnykh setei dlya diagnostiki elektromekhanicheskikh sistem [Application of neural networks for diagnostics of electromechanical systems]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining information and analytical Bulletin], 2011, no. 4, pp. 132–139.

24. Bearing fault diagnosis using multi-scale entropy and adaptive neuro-fuzzy inference / L. Zhang, G. Xiong, H. Liu et al. // *Expert Systems with Applications*. 2010. No. 37. Pp. 6077–6085.

25. Machine health monitoring with LSTM networks / R. Zhao, J. Wang, R. Yan et al. // *10th International Conference on Sensing Technology (ICST)*. 2016. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICSensT.2016.7796266.

26. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // *Nature*. 2015. Vol. 521. P. 436–444.

27. Sozykin A.V. Obzor metodov obucheniya glubokikh neironnykh setei [Review of deep neural network training methods]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Computer Science], 2017, vol. 6, no. 3, pp. 28–59.

### Информация об авторах

**Великанов Владимир Семенович**, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; e-mail: rzhik\_00@mail.ru.

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

**Панфилова Ольга Рашидовна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; e-mail: halikova@inbox.ru.

### Information about the authors

**Vladimir S. Velikanov**, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Lifting and transport machines and robots, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg; e-mail: rzhik\_00@mail.ru.

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

**Ol'ga R. Panfilova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mining machines and transport and technological complexes, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk; e-mail: halikova@inbox.ru.

**ДАНЕЕВ АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ****Доктор технических наук, профессор**

Алексей Васильевич родился 30 января 1956 года в пос. Нижний Холтосон Бурятской АССР. В 1978 году окончил Новосибирский государственный университет. После окончания университета работал в Сибирском энергетическом институте СО АН СССР и Иркутском вычислительном центре СО АН СССР (ныне Институт динамики систем и теории управления СО РАН).

Работая на научных должностях в подразделениях СО АН СССР, А.В. Данеев являлся исполнителем ряда правительственных тем, проводимых институтом по постановлению СМ СССР, одна из которых была отмечена Премией Совета Министров СССР. Занимался оптимальным проектированием транспортных средств, исследованиями по созданию программного и алгоритмического обеспечения управления такими объектами. В 1992 году Алексей Васильевич защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по теме «Исследование задач и разработка программ оптимизации осесимметричных тел в сверхзвуковом потоке газа».

С 1992 года по 1996 год преподавал на факультете транспортных систем Иркутского государственного технического университета (ныне - ИРНИТУ). Обучался три месяца в 1995 году в учебном центре «Элея» (Турин, Италия) по программе «ТАСИС». С 1996 года по 2011 год работал в Восточно-Сибирском институте МВД России, в том числе начальником Улан-Удэнского филиала. Проходил обучение в учебном центре «Легионово» (Варшава, Польша). С 2011 года и по настоящее время работает в Иркутском государственном университете путей сообщения.

В 2004 году Алексей Васильевич защитил докторскую диссертацию на тему «Моделирование и оптимизация в динамике специальных типов летательных аппаратов», а в 2005 году ему присвоено ученое звание профессора. А.В. Данеев является автором и соавтором более 400 научных работ, включая 8 монографий, а также 12 учебных пособий. За последние 5 лет вышли 3 монографии по управлению транспортными средствами, одна из них – в издательстве «Наука», является автором ряда статей по инфраструктуре информационного пространства Улан-Баторской железной дороги, высокоскоростным дорогам Китая. Являлся научным редактором ежегодной научной серии «Асимптотические методы в теории систем», член редколлегии журналов «Advances in Differential Equations and Control Processes» (Web of Science), «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование» (ВАК), «Вестник БГУ. Математика, информатика» (ВАК) и других изданий, входит в состав международной референтной группы ученых экспертного научного сообщества журнала «Известия Самарского научного центра Российской академии наук», является председателем оргкомитета ежегодной международной научно-практической конференции «Информационные технологии, их приложения и информационное образование» (2018-2021 гг.), членом оргкомитетов многих других симпозиумов и конференций.

В работах А.В. Данеева в терминах общих конструкций метода сравнения и теории устойчивости инвариантных множеств поставлена и исследована задача оптимальной стабилизации пучка попадающих траекторий в динамике процесса высокоточного наведения для одного класса беспилотных летательных аппаратов с аналоговым рулевым приводом. Им предложен новый оптимизационный подход к построению элементов теории структурной идентификации линейных непрерывных динамических систем с управлением: основа – аналитическое решение задачи реализации Калмана-Месаровича в классе сильных конечномерных линейных нестационарных дифференциальных моделей. Им получены теоремы локально-оптимальной трассировки маршрута полета, позволившие существенно сократить объем вычислений комбинаторного алгоритма «ветвей и границ» по поиску оптимальной траектории полета в сложном поле конфигурационных препятствий. Предложен метод сведения линейной нестационарной

инвариантных множеств поставлена и исследована задача оптимальной стабилизации пучка попадающих траекторий в динамике процесса высокоточного наведения для одного класса беспилотных летательных аппаратов с аналоговым рулевым приводом. Им предложен новый оптимизационный подход к построению элементов теории структурной идентификации линейных непрерывных динамических систем с управлением: основа – аналитическое решение задачи реализации Калмана-Месаровича в классе сильных конечномерных линейных нестационарных дифференциальных моделей. Им получены теоремы локально-оптимальной трассировки маршрута полета, позволившие существенно сократить объем вычислений комбинаторного алгоритма «ветвей и границ» по поиску оптимальной траектории полета в сложном поле конфигурационных препятствий. Предложен метод сведения линейной нестационарной

системы «объект-регулятор» к линейной автономной модели, допускающей использование стандартных приемов линейного анализа динамики систем. В числе научных направлений, развиваемых А.В. Данеевым, особое место занимает экранопланостроение. Экранопланы – летательные аппараты, использующие положительное влияние опорной поверхности (экрана) на аэродинамическое качество крыла за счет динамической воздушной подушки. А.В. Данеев участвовал в создании и испытаниях экраноплана АДП-5, в том числе на экспериментальной базе вблизи п. Балаганск. Другим важным научным направлением является создание программных комплексов: ППП «Микрон», АСНИ «Бизон» и др.

В рамках указанных научных направлений под научным руководством Алексея Васильевича подготовлено и защищено 5 кандидатских диссертации, 4 работы на соискание ученой степени кандидата наук им консультировались. В настоящее время А.В. Данеев является руководителем 4 аспирантов. Является членом диссертационного совета и заместителем председателя Научно-технического совета ИрГУПС. Награды: Почетный сотрудник МВД России, заслуженный работник правоохранительных органов РБ, Почетная грамота Министерства внутренних дел Российской Федерации, нагрудные знаки «За верность долгу», «200 лет МВД», ведомственные и юбилейные медали.

Является членом ряда научных организаций (общественных академий): Российской инженерной академии, Международной инженерной академии, академии естествознания и др.

Принимал участие во многих научных проектах, грантах. В настоящее время является участником двух грантов Российского фонда фундаментальных исследований: 19-01-00301 А (исполнитель) и 21-11-00007 Д (руководитель).

А.В. Данеева отличает многогранность интересов и богатая эрудиция, философская широта охвата действительности, оригинальность мышления, талант лектора и педагога.

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

**№ 2 ( 74 )**  
**2 0 2 2**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Главный редактор **А.П. Хоменко**  
Ответственный за выпуск **Д.В. Буторин**

Подписано в печать 29.07.2022. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 01.08.2022

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 24,53.

Уч.-изд. л. 20,75. Тираж 500 экз. Заказ № 3617

Подписной индекс по каталогу «Урал-Пресс»: 64556

ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН.

Сведения о журнале ежегодно

публикуются в международной справочной системе

по периодическим и продолжающимся изданиям

«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01

Маркировка информационной продукции - не маркируется

Цена свободная

Адрес редакции, издательства и типографии

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения

Телефон: 8(3952) 63-83-57, E-mail: stsam@irgups.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Учредитель: ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет путей сообщения  
(664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)