

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 № 3(75)  
No. 3(75)

Современные технологии.  
Системный анализ. Моделирование

ISSN 1813-9108 (Print)

# Современные технологии Системный анализ Моделирование

2022  
№ 3 (75)

Иркутский государственный  
университет путей сообщения

Машиностроение • Машиноведение • Энергетические системы • Транспорт



Д.Т.Н., ДО

«Применение  
неклассических  
логик в задачах  
искусственного  
интеллекта  
и анализа данных»

АРШИНСКИЙ ЛЕОНИД  
ВАДИМОВИЧ

# Modern technologies System analysis Modeling

2022  
No. 3 (75)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

Machine Building • Theoretical Engineering • Energy Systems • Transport

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

**№ 3 (75)**  
**2 0 2 2**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

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

---

#### Приоритетные цели журнала

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

#### Стратегические задачи

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

#### Учредитель и издатель

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

#### Главный редактор

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

#### Заместители главного редактора

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

#### Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Телефон:** +7(3952) 63-83-57

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

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

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

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

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

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

# Modern technologies System analysis Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)

2022  
No. 3 (75)

Founded in 2004

Published quarterly

## Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

### Aims and Scope

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

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

### Founder and publisher

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

### Editor-in-Chief

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

### Deputy Editor-in-Chief

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

### Editorial council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

<b>Попов И.П.</b> Ротатор с постоянной частотой вращения .....	10
<b>Белоголов Ю. И.</b> Расчет тонкостенного уплотнения пониженной жесткости .....	18
<b>Данеев А.В., Данеев Р.А., Сизых В.Н., Хоменко А.П.</b> Квазианалитический метод решения дифференциальных уравнений электромашинных вентильных систем .....	29
<b>Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Костин П.Н.</b> Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой при попутном и встречном фрезеровании .....	38
<b>Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А., Нгуен Минь Хоанг</b> Моделирование формирования основных показателей качества поверхностного слоя деталей при дробеударном уплотнении .....	50

**Транспорт**

<b>Мартусов А.Л.</b> Разработка алгоритма управления регуляторами мощности испытательной станции тяговых электродвигателей подвижного состава .....	60
<b>Милованова Е.А., Гозбенко В.Е.</b> Применение энергосберегающих технологий при обслуживании и ремонте подвижного состава .....	70
<b>Ковенькин Д.А., Насников Д.Н., Чернецкая И.С.</b> Применение программного комплекса Frost 3D Universal для проведения прогнозных теплотехнических расчетов земляного полотна .....	80
<b>Давыдов Ю.А., Заболотный В.В., Мухин О.О.</b> Математическая модель расчета потерь в тяговых электродвигателях пульсирующего тока .....	91
<b>Кашковский В.В., Тихий И.И., Глинский И.Ю., Корнило Ю.А.</b> Исследование методических погрешностей диагностических комплексов неразрушающего контроля .....	102
<b>Немыкина В.В.</b> Анализ качества трехфазного напряжения и тока в цепях асинхронных вспомогательных машин электровоза .....	112
<b>Суханов Г.И., Супруновский А.В., Баясгалан Д.</b> Увеличение провозной способности железной дороги Монголии при создании новых транспортных коридоров .....	120
<b>Хамнаева А.А.</b> Моделирование расхода сжатого воздуха пневматических систем на примере работы тормозов поезда в режиме зарядки и отпуска .....	130
<b>Мартыненко Л.В.</b> Моделирование динамических характеристик вагона в программном комплексе «Универсальный механизм УМ» .....	139
<b>Оленевич В.А., Власова Н.В., Каимов Е.В.</b> Анализ влияния пропуска длинносоставных поездов на участке железнодорожного пути на качественные показатели графика движения поездов и безопасность перевозочного процесса .....	149
<b>Нехаев В.А., Николаев В.А., Леоненко Е.Г.</b> Движение электровоза ЭП2К по неравноупругому железнодорожному пути без геометрических неровностей на поверхности катания рельсов .....	159

**Тэк Енг Ли, Король Р.Г.** Имитационное моделирование и оценка перерабатывающей способности элементов транспортного узла Пусан ..... 171

**Пузина Е.Ю.** Моделирование ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Юрты – Нижнеудинск при реализации систем интервального регулирования ..... 181

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

**Великанов В.С. , Ильина Е.А., Кочержинская Ю.В.** Визуализация и анализ информации на основе компьютерного моделирования испытаний кабины карьерного гусеничного экскаватора на соответствие требованиям безопасности ..... 196

### **Персоналии**

Д.т.н., доцент Аршинский Л.В. .... 207

## CONTENTS

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

<b>Popov I.P.</b> Rotator with constant frequency .....	10
<b>Belogolov Yu. I.</b> Calculation of a thin-walled seal of reduced stiffness .....	18
<b>Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N., Khomenko A.P.</b> Quasi-analytical method for solution of differential equations of electric machine valve systems .....	29
<b>Luk'yanov A.V., Aleinikov D.P., Kostin P.N.</b> Investigation of oscillations in the forces of interaction of the milling cutter with the workpiece during passing and counter milling .....	38
<b>Kol'tsov V.P., Le Chi Vinh, Starodubtseva D.A., Nguyen Minh Hoang</b> Modeling of the formation of the main quality indicators of the surface layer of parts during shot-impact hardening .....	50

**Transport**

<b>Martusov A.L.</b> Development of an algorithm for controlling the power regulators in the testing station of rolling stock traction electric motors .....	60
<b>Milovanova E.A., Gozbenko V.E.</b> The use of energy-saving technologies in the maintenance and repair of rolling stock .....	70
<b>Kovenkin D.A., Nasnikov D.N., Chernetskaya I.S.</b> Application of the Frost 3D Universal software package for predictive thermal calculations of the roadbed .....	80
<b>Davydov Yu.A., Zabolotnyi V.V., Mukhin O.O.</b> Mathematical model for calculating losses in pulsed current traction motors .....	91
<b>Kashkovskii V.V., Tikhii I.I., Glinskii I.Yu., Kornilo Yu.A.</b> Study of methodological errors of non-destructive testing diagnostic complexes .....	102
<b>Nemykina V.V.</b> Quality analysis of currents and voltages in circuits of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives .....	112
<b>Sukhanov G.I., Suprunovskii A.V., Bayasgalan D.</b> Increasing the carrying capacity of the Mongolian railway when creating new transport corridors .....	120
<b>Khamnaeva A.A.</b> Modeling of the compressed air consumption in the pneumatic systems on the example of the train brakes operation during charging and release mode .....	130
<b>Martynenko L.V.</b> Modeling of the dynamic characteristics of the wagon in the software package «Universal mechanism UM» .....	139
<b>Olentsevich V.A., Vlasova N.V., Kaimov E.V.</b> Analysis of the impact of the long-distance trains passage in a railway track section upon the quality indicators of the train schedule and the safety of the transportation process .....	149
<b>Nekhaev V.A., Nikolaev V.A., Leonenko E.G.</b> Movement of the EP2K electric locomotive along an unevenly elastic railway track without geometric irregularities on the rail rolling surface .....	159

**Taek Young Lee, Korol' R.G.** Simulation modeling and evaluation of processing capacity of Busan transport hub elements ..... 171

**Puzina E.Yu.** Modeling of repair operation modes of the power supply system of the Yurts – Nizhneudinsk section during the implementation of interval control systems ..... 181

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

**Velikanov V.S., Il'ina E.A., Kocherzhinskaya Yu.V.** Visualization and analysis of information based on computer simulation of the quarry tracked excavator cabin tests for the compliance with safety requirements ..... 196

### **Personalities**

Doctor of Engineering Science, Associate Professor L.V. Arshinskiy ..... 207



**Требования к статьям, принимаемым к публикации**

Рукописи статей представляются в электронном и распечатанном виде.

Рекомендуемый объем статей 9-12 стр.

1. К статье прилагается:

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

2. Статья включает в себя:

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

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

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

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

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

При вставке формул использовать только Microsoft Equation 3 с параметрами:

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

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

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

Статьи, представляемые в журнал, проходят обязательное рецензирование.

Самоцитирование журнала в статьях **запрещено**.

Пример оформления статьи представлен на сайте журнала: <https://ojs.ircgups.ru/index.php/stsam>

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

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

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

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

Телефон: 8( 3952) 63-83-57. E-mail: [stsam@ircgups.ru](mailto:stsam@ircgups.ru)

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МАШИНОВЕДЕНИЕ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

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

## Ротатор с постоянной частотой вращения

И.П. Попов✉

Курганский государственный университет, г. Курган, Российская Федерация

✉ip.popov@yandex.ru

### Резюме

Цель работы – нахождение механического аналога циклотронного движения и определение схемы соответствующего устройства, которое уместно назвать стабилизированным ротатором. Тема стабилизации частоты вращения является актуальной. Из ключевого обстоятельства, определяющего возможность распространения циклотронного движения на механику, заключающегося в том, что лагранжиан электрона вдвое больше его кинетической энергии (применительно к стабилизированному ротатору нужно трактовать как равенство кинетической и потенциальной энергий), необходимо следует, что в состав стабилизированного ротатора должны входить элементы, которые в состоянии запаса оба этих вида энергии, а именно, груз и пружина. Собственная частота вращения стабилизированного ротатора строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной частотой колебаний маятника с идентичными параметрами. При смене момента импульса изменяется радиус и тангенциальная скорость (частота вращения при этом остается прежней и равна собственной). При нулевом вращающем моменте в стационарном режиме частота вращения стабилизированного ротатора не может быть произвольной и принимает единственное значение. Подобно тому как при вынужденных колебаниях маятника частота не совпадает с собственной частотой, частота вращения стабилизированного ротатора при нагружении не совпадает с собственной частотой вращения. Стабилизированный ротатор может использоваться для управления собственной частотой колебаний радиального осциллятора, хотя в этом случае он имеет возможность сильной конкуренции со стороны мехатронных систем. Напротив, в качестве стабилизатора вращений его конкурентные возможности неоспоримы и определяются предельной простотой конструкции.

### Ключевые слова

стабилизированный ротатор, маятник, частота вращения, потенциальная энергия, кинетическая энергия, момент импульса, циклотронное движение

### Для цитирования

Попов И.П. Ротатор с постоянной частотой вращения / И.П. Попов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3(75). – С. 10–17. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).10-17.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 11.06.2022 г.; поступила после рецензирования: 15.09.2022 г.; принята к публикации: 19.09.2022 г.

## Rotator with constant frequency

I.P. Popov✉

Kurgan State University, Kurgan, the Russian Federation

✉ip.popov@yandex.ru

### Abstract

The aim of the work is to find a mechanical analogue of cyclotron motion and to determine the scheme of the corresponding device to be appropriately called a stabilized rotator. The topic of speed stabilization is relevant. From the key circumstance determining the possibility of generalizing cyclotron motion to mechanics, consisting in the fact that the Lagrangian of an electron is twice as large as its kinetic energy, which, as applied to a stabilized rotator, should be interpreted as the equality of kinetic and potential energies, it follows that a stabilized rotator should include elements, capable to store both of these types of energy, namely, the load and the spring. The natural frequency of rotation of a stabilized rotator is strictly fixed (it does not depend on either the moment of inertia or the angular momentum) and remarkably coincides with the natural frequency of oscillations of a pendulum with identical parameters. When the angular momentum changes, the radius and tangential velocity change (while the rotation frequency does not change and is equal to the natural). At zero torque in the stationary mode, the rotational frequency of the stabilized rotator cannot be random and takes on a single value. Just as the forced oscillation frequency of the pendulum does not coincide with its natural frequency, the rotation frequency of a stabilized rotator under loading does not coincide with its natural rotation frequency. A stabilized rotator can be used to control the natural frequency of a radial oscillator, although in this case it may meet strong competition from mechatronic systems. On the contrary, as a rotation stabilizer, its competitive capabilities are undeniable and are determined by the extreme simplicity of the design.

### Keywords

stabilized rotator, pendulum, rotation frequency, potential energy, kinetic energy, angular momentum, cyclotron motion

**For citation**

Popov I.P. Rotator s postoyannoi chastotoi vrashcheniya [Rotator with constant frequency]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 10–17. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).10-17.

**Article info**

Received: June 11, 2022; Received: September 15, 2022; Accepted: September 19, 2022.

**Введение**

Для нормальной работы многих технических систем требуется стабилизированная частота вращения. К таким системам относятся генераторные установки переменного тока, насосные станции, конвейерные линии, обрабатывающие станки, ветрогенераторы и др.

Существующие ротаторы могут свободно вращаться с любой скоростью, поэтому для их стабилизации используют специальные устройства, как правило, следящего типа, что приводит к усложнению и удорожанию конструкций.

В этой связи представляет интерес возможность создания ротатора с фиксированной частотой свободного вращения, что и является целью настоящей работы.

Механические и электромагнитные явления и процессы во многих случаях математически изоморфны [1–3]. Это дает возможность использовать достижения одной научной специальности в другой. В этом смысле представляет интерес циклотронное движение электрического заряда [4], которое характеризуется *фиксированной частотой вращения*. Это следует из баланса сил:

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow v = \frac{qB}{m}r = \omega r \Rightarrow \omega = \frac{qB}{m},$$

где  $q$  – величина электрического заряда;  $v$  – тангенциальная скорость заряда;  $B$  – магнитная индукция;  $m$  – масса заряженной частицы;  $r$  – радиус циклотронного движения;  $\omega$  – частота вращения.

Частота действительно не зависит ни от скорости, ни от радиуса.

Ключевым обстоятельством для возможности распространения циклотронного движения на механику является то, что лагранжиан электрона, движущегося поперек постоянного магнитного поля, вдвое больше его кинетической энергии:

$$L = \frac{mv^2}{2} + e(v, A).$$

Векторный потенциал магнитного поля равен

$$A = \frac{1}{2}[B, r].$$

При этом  $v = [\omega, r]$ . Таким образом,

$$L = \frac{mv^2}{2} + \frac{q^2 B^2 r^2}{2m}.$$

Второе слагаемое равно

$$\frac{q^2 B^2 r^2}{2m} = \frac{q^2 B^2}{2m} \frac{m^2 v^2}{q^2 B^2} = \frac{mv^2}{2}. L = 2 \frac{mv^2}{2}.$$

Целью работы является нахождение механического аналога циклотронного движения и определение схемы соответствующего устройства, которое уместно назвать стабилизированным ротатором.

Тема стабилизации частоты вращения является актуальной [5–7].

**Методика**

При создании стабилизированного ротатора следует учитывать, что, с одной стороны, основная масса известных ротаторов характеризуется тем, что их скорость вращения не является фиксированной, а с другой стороны, механизмом, обладающим фиксированным частотным параметром, является пружинный маятник.

Таким образом, ключом к достижению поставленной цели может быть объединение свойств ротатора и пружинного маятника.

Теоретической основой такого объединения является разложение вращательного движения на два взаимно ортогональных гармонических движения:

$$r^2 = r^2 \cos^2 \varphi(t) + r^2 \sin^2 \varphi(t).$$

И наоборот, два взаимно ортогональных гармонических движения образуют вращательное движение.

Это обстоятельство косвенно свидетельствует о том, что в состав стабилизированного ротатора могут входить конструктивные элементы пружинного маятника.

**Синтез стабилизированного ротатора**

Из ключевого обстоятельства, определяющего возможность распространения циклотрон-

ного движения на механику, заключающегося в том, что лагранжиан электрона вдвое больше его кинетической энергии (применительно к стабилизированному ротатору следует трактовать как равенство кинетической и потенциальной энергий), необходимо следует, что в состав стабилизированного ротатора должны входить элементы, которые в состоянии запасать оба этих вида энергии, а именно, груз (массой  $m$ ) и пружина (с коэффициентом упругости  $k$ ).

Согласно характеру циклотронного движения и, соответственно, ротатора, имеет место радиус вращения ( $r$ ) и циклическая частота ( $\omega$ ).

Из равенства энергий следует:

$$\frac{k(\Delta x)^2}{2} = \frac{mv^2}{2} = \frac{mr^2\omega^2}{2} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \frac{\Delta x}{r},$$

где  $\Delta x$  – абсолютная деформация пружины.

Неизменность циклической частоты обеспечивается очевидным ключевым условием  $\Delta x = r$ .

Установленные необходимые обстоятельства определяют принципиальную схему стабилизированного ротатора, которая представлена на рис. 1.

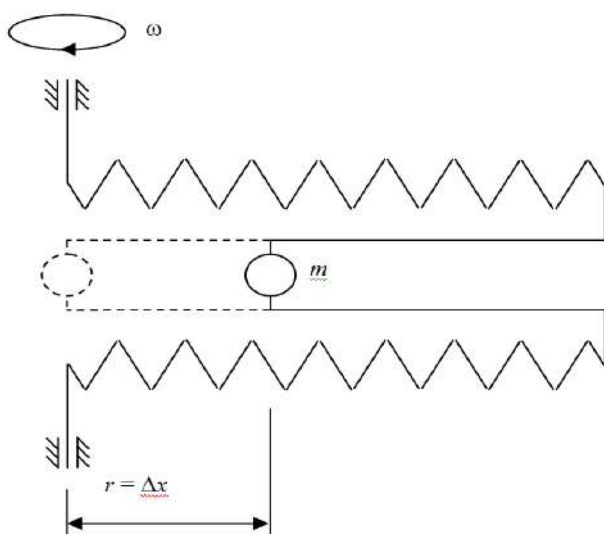


Рис. 1. Стабилизированный ротатор  
Fig. 1. Stabilized rotator

Собственная частота вращения стабилизированного ротатора:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной ча-

стотой колебаний маятника с идентичными параметрами [8, 9].

### Кинематика стабилизированного ротатора

Момент импульса стабилизированного ротатора равен:

$$L = J\omega_0 = mr^2\omega_0 = mr^2\sqrt{\frac{k}{m}} = r^2\sqrt{mk}.$$

Здесь  $J$  – момент инерции,  $x_\omega = \sqrt{mk}$  – волновой реактанс [10]. При этом:

$$r = \frac{v}{\omega_0}; L = r^2x_\omega = \frac{v^2}{\omega_0^2}x_\omega = v^2\frac{m}{k}\sqrt{mk} = \frac{m}{\omega_0}v^2.$$

При изменении момента импульса меняется радиус и тангенциальная скорость (частота вращения остается прежней и равна собственной).

Положению груза, при котором его центр масс совпадает с осью вращения, соответствует состояние неопределенного равновесия. При вращении груз равновероятно может отклониться в любую из двух сторон и, соответственно, будет развиваться как сжатие, так и растяжение пружины.

Состояние неопределенного равновесия можно исключить, обеспечив начальное (статическое) смещение груза  $r_0$  и равную ему начальную деформацию пружины.

### Динамика стабилизированного ротатора

При раскручивании преднапряженного ротатора до частоты  $\omega_0$  центробежная сила  $m\omega^2r$  меньше силы начальной деформации пружины  $kr_0$ , поэтому радиус  $r_0$  не изменяется. Это участок линейной динамики  $[0, \omega_0]$ :

$$r = r_0, \quad \omega = \frac{M}{mr_0^2}t.$$

За время  $t_0$  при постоянном вращающем моменте  $M$  ротатор достигнет частоты вращения  $\omega_0$ :

$$t_0 = \frac{\omega_0 mr_0^2}{M} = \frac{\sqrt{mk}r_0^2}{M} = \frac{L_0}{M}.$$

При дальнейшем нагружении стабилизированного ротатора вращающим моментом его динамика (нелинейный участок) описывается системой двух дифференциальных уравнений – вращательного и поступательного (радиального):

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{J} = \frac{M}{mr^2} \\ m \frac{d^2r}{dt^2} = \frac{mv^2}{r} - kr = \frac{m\omega^2 r^2}{r} - kr = (m\omega^2 - k)r \end{cases}.$$

Трение здесь не учитывается.

Начальные условия:

$$\omega|_{t=t_0} = \omega_0, \quad r|_{t=t_0} = r_0, \quad \left. \frac{dr}{dt} \right|_{t=t_0} = 0.$$

Из системы уравнений и начальных условий следует:

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=t_0} = \frac{M}{mr_0^2}.$$

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} = -2\frac{M}{mr^3} \frac{dr}{dt}, \quad \left. \frac{d^2\omega}{dt^2} \right|_{t=t_0} = 0.$$

$$\frac{d^2r}{dt^2} = (\omega^2 - \omega_0^2)r, \quad \left. \frac{d^2r}{dt^2} \right|_{t=t_0} = 0.$$

$$\frac{d^3r}{dt^3} = 2\omega \frac{d\omega}{dt} r + (\omega^2 - \omega_0^2) \frac{dr}{dt},$$

$$\left. \frac{d^3r}{dt^3} \right|_{t=t_0} = 2\omega_0 \frac{M}{mr_0^2} r_0 = 2\omega_0 \frac{M}{mr_0}.$$

$$\frac{d^3\omega}{dt^3} = 6\frac{M}{mr^4} \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 - 2\frac{M}{mr^3} \frac{d^2r}{dt^2}, \quad \left. \frac{d^3\omega}{dt^3} \right|_{t=t_0} = 0.$$

$$\frac{d^4\omega}{dt^4} = -24\frac{M}{mr^5} \left( \frac{dr}{dt} \right)^3 + 6\frac{M}{mr^4} 2\frac{dr}{dt} \frac{d^2r}{dt^2} + 6\frac{M}{mr^4} \frac{dr}{dt} \frac{d^2r}{dt^2} - 2\frac{M}{mr^3} \frac{d^3r}{dt^3},$$

$$\left. \frac{d^4\omega}{dt^4} \right|_{t=t_0} = -2\frac{M}{mr_0^3} 2\omega_0 \frac{M}{mr_0} = -4\omega_0 \frac{M^2}{m^2 r_0^4}.$$

$$\frac{d^4r}{dt^4} = 2\left( \frac{d\omega}{dt} \right)^2 r + 2\omega \frac{d^2\omega}{dt^2} r + 2\omega \frac{d\omega}{dt} \frac{dr}{dt} + 2\omega \frac{d\omega}{dt} \frac{dr}{dt} + (\omega^2 - \omega_0^2) \frac{d^2r}{dt^2},$$

$$\left. \frac{d^4r}{dt^4} \right|_{t=t_0} = 2\left( \frac{M}{mr_0^2} \right)^2 r = \frac{2M^2}{m^2 r_0^3}.$$

Частота вращения стабилизированного ротора и радиус представимы в виде:

$$\begin{aligned} \omega &\approx \frac{1}{0!} \omega(0)t^0 + \frac{1}{1!} \frac{d\omega}{dt}(0)t^1 + \frac{1}{2!} \frac{d^2\omega}{dt^2}(0)t^2 + \\ &+ \frac{1}{3!} \frac{d^3\omega}{dt^3}(0)t^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4\omega}{dt^4}(0)t^4 + \dots = \\ &= \omega_0 + \frac{M}{mr_0^2} t + \frac{1}{2!} 0t^2 + \frac{1}{3!} 0t^3 - \frac{1}{4!} 4\omega_0 \frac{M^2}{m^2 r_0^4} t^4 + \dots = (2) \\ &= \omega_0 + \frac{M}{mr_0^2} t - \frac{\omega_0 M^2}{6m^2 r_0^4} t^4 + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r &\approx \frac{1}{0!} r(0)t^0 + \frac{1}{1!} \frac{dr}{dt}(0)t^1 + \frac{1}{2!} \frac{d^2r}{dt^2}(0)t^2 + \\ &+ \frac{1}{3!} \frac{d^3r}{dt^3}(0)t^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4r}{dt^4}(0)t^4 + \dots = \\ &= r_0 + 0t + \frac{1}{2!} 0t^2 + \frac{1}{3!} 2\omega_0 \frac{M}{mr_0} t^3 + \frac{1}{4!} \frac{2M^2}{m^2 r_0^3} t^4 + \dots = \\ &= r_0 + \frac{\omega_0 M}{3mr_0} t^3 + \frac{M^2}{12m^2 r_0^3} t^4 + \dots \end{aligned}$$

Вопрос о сходимости рядов здесь не рассматривается [11–13].

Смысл последних двух уравнений состоит в иллюстрации нелинейности динамики стабилизированного ротора при нагружении его постоянным вращающим (тормозящим) моментом.

Подобно тому как при вынужденных колебаниях маятника частота не совпадает с собственной частотой, частота вращения стабилизированного ротора при нагружении не совпадает с собственной частотой вращения.

Из (2) следует, что чем меньше момент  $M$  и больше  $m$  и  $r_0$ , тем меньше отклонение частоты вращения  $\omega$  от собственной  $\omega_0$ .

### Использование стандартного классического решения

Стабилизированный ротор в виде суперпозиций двух ортогональных пружинных маятников (рис. 2) представлен выражением:

$$r(t) = ir \cos \varphi(t) + jr \sin \varphi(t).$$

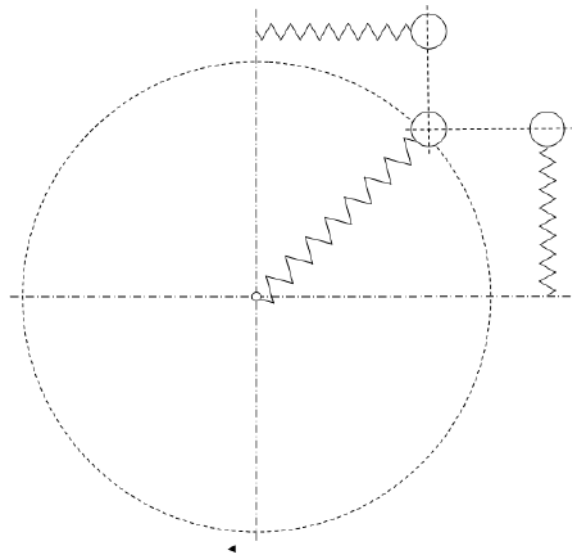


Рис. 2. Суперпозиция пружинных маятников  
Fig. 2. Superposition of spring pendulums

Это дает возможность использовать хрестоматийные решения для вынужденных колебаний маятника при описании нестационарного режима стабилизированного ротатора, а именно:

$$r(t) = i[r_0 e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \frac{x_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} \cos\left(\omega t - \arctg \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega_1^2}\right) + j[r_0 e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \frac{x_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} \sin\left(\omega t - \arctg \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega_1^2}\right)].$$

Здесь  $r_0$  – начальный радиус;  $\delta = R/(2m)$  – коэффициент затухания;  $R$  – коэффициент сопротивления;  $\omega_1^2 = \omega_0^2 - \delta^2 > 0$ ,  $\varphi_1$  – начальная фаза;  $\omega$  – частота вынужденных колебаний;  $x_0 = F/(2m)$ ;  $F$  – возмущающая сила.

По мере затухания собственных колебаний стабилизированный ротатор будет вращаться с циклической частотой  $\omega$ , а его радиус примет значение:

$$r = \frac{x_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} = \frac{2mF}{R\sqrt{R^2 + 16m^2 \omega^2}}.$$

При  $\omega_1^2 \leq 0$  происходит аperiодическое затухание.

### Второе замечательное свойство стабилизированного ротатора

Первым замечательным свойством является фиксированная собственная частота вращения (1) и ее совпадение с собственной частотой колебаний маятника.

При *вынужденном* вращении стабилизированного ротатора с постоянной частотой  $\omega = a\omega_0$  ( $a$  – безразмерный коэффициент) его радиальная динамика определяется уравнением:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \left(\omega^2 - \frac{k}{m}\right)r = (a^2 \omega_0^2 - \omega_0^2)r = -(1 - a^2)\omega_0^2 r.$$

В зависимости от значения  $a$  возможны три варианта.

1. При  $a < 1$  имеет место дифференциальное уравнение свободных гармонических незатухающих колебаний с собственной частотой

$$\omega_a = \omega_0 \sqrt{1 - a^2}.$$

Таким образом, стабилизированный ротатор дает возможность управлять собственной ча-

стотой радиального осциллятора [14, 15].

2. При  $a = 1$ :

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = 0, \quad \frac{dr}{dt} = V = \text{const}, \quad r = r_{01} + Vt.$$

Колебания не происходят.

3. При  $a > 1$ :

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = (a^2 - 1)\omega_0^2 r, \quad r = r_{01} e^{(\omega_0 \sqrt{a^2 - 1})t}.$$

Колебания не происходят.

Затухание колебаний в стабилизированном ротаторе принципиально не отличается от затухания в обычном маятнике [16–18].

### Выбег ротатора в стабилизированном режиме

Минимальная полная энергия стабилизированного ротатора в стабилизированном режиме соответствует статическому смещению груза  $r_0$ :

$$W_0 = K_0 + U_0 = 2K_0 = 2U_0 = kr_0^2.$$

Максимальная полная энергия теоретически не ограничена, а практически определяется конструктивно установленным максимальным радиусом  $r_m$ :

$$W_m = kr_m^2.$$

Пусть средняя за выбег мощность диссипативных потерь равна  $P$ .

Тогда время выбега составит

$$\tau = \frac{W_m - W_0}{P} = k \frac{r_m^2 - r_0^2}{P}.$$

Очевидно, что чем меньше  $P$ , тем меньше отклонение частоты вращения  $\omega$  от собственной  $\omega_0$ .

### Основные результаты

1. Стабилизация частоты вращения ротатора (и заряда при циклотронном движении) обусловлена равенством кинетической и потенциальной энергий.

2. Стабилизация частоты вращения обеспечивается равенством радиуса вращения и величины деформации упругого элемента.

3. Собственная частота вращения ротатора равна собственной частоте колебаний маятника с идентичными параметрами.

4. При изменении момента импульса радиус и тангенциальная скорость изменяются таким образом, что частота вращения остается прежней и равна собственной.

5. Происходит изменение собственной

частоты колебаний радиального маятника  $\omega_a = \omega_0 \sqrt{1-a^2}$  при вынужденном вращении стабилизированного ротора с постоянной частотой  $\omega = a\omega_0$  ( $a < 1$ ).

6. При вынужденном вращении стабилизированного ротора с постоянной частотой  $\omega = \omega_0$  радиус вращения линейно возрастает  $r = r_{01} + Vt$ .

7. При вынужденном вращении стабилизированного ротора с постоянной частотой, превышающей собственную, радиус вращения возрастает экспоненциально  $r = r_{01} e^{(\omega_0 \sqrt{a^2-1})t}$ .

8. Установлено дуальное соответствие циклотронного движения электрического заряда и вращения механического ротора.

9. Математическая модель строится на основе уже имеющейся конструкции. В настоящей работе принципиальное конструктивное решение возникло как следствие математической модели.

## Заключение

Заявленная цель работы достигнута. Механический аналог циклотронного движения определен. Им является стабилизированный

ротор, обладающий фиксированной частотой вращения, не зависящей от момента импульса и момента инерции.

Это означает, что при нулевом вращающем моменте в стационарном режиме частота вращения стабилизированного ротора не может быть произвольной и принимает единственное значение.

Другими особенностями стабилизированного ротора являются идентичность формулы частоты вращения формуле частоты пружинного маятника, равенство кинетической и потенциальной энергии и вытекающее из этого равенство радиуса вращения груза величине деформации пружины.

Стабилизированный ротор может использоваться для управления собственной частотой колебаний радиального осциллятора, но в этом качестве он может иметь конкуренцию со стороны мехатронных систем [19, 20].

Напротив, в качестве стабилизатора вращений его конкурентные возможности неоспоримы и определяются предельной простотой конструкции.

## Список литературы

1. Попов И.П. Реактансы и сассептансы механических систем // Вестн. Томск. гос. ун-та. Математика и механика. 2021. № 70. С. 64–75.
2. Павлов В.Д. Накопитель энергии транспортно-технологической машины с возможностью автоматического управления // Автоматизированные технологии и производства. 2021. № 2 (24). С. 7–10.
3. Попов И.П. Электромагнитный маховик для ориентирования орбитальных объектов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2019. № 2. С. 15–17.
4. Павлов В.Д. Теоремы об излучении заряда // Инженерная физика. 2021. № 6. С. 37–40.
5. Вершинин А.С. Варианты построения высокоточных систем стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. 2020. № 12. С. 77–86.
6. Ислотов И.И. Функциональная схема стабилизации частоты вращения ветрогенератора с использованием электромагнитного редуктора // Энергетик. 2017. № 5. С. 41–43.
7. Николаев В.Т. Исследование компенсационной схемы стабилизации скорости вращения миниатюрного коллекторного электродвигателя постоянного тока // Электронные информационные системы. 2021. № 3 (30). С. 25–32.
8. Каюмов О.Р. Оптимальное по быстродействию перемещение тележки с маятником // Изв. Рос. акад. наук. Теория и системы управления. 2021. № 1. С. 30–41.
9. Гладков С.О., Богданова С.Б. Теория детерминированного хаоса в системе  $n$  взаимодействующих компланарных маятников // Инженерная физика. 2019. № 3. С. 9–21.
10. Попов И.П. Применение символического (комплексного) метода для исследования околорезонансных явлений // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 4. С. 145–153.
11. Гайсина Г.А. Порядок роста ряда экспонент вблизи границы области сходимости // Алгебра и анализ. 2021. Т. 33. № 3. С. 31–50.
12. Беляев В.А. О сходимости по диагоналям и абсолютной сходимости степенных рядов с действительными коэффициентами // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2019. № 1 (23). С. 98–107.
13. Тимошенко В.В. К сходимости в смысле Чезаро числовых рядов // Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры. 2020. Т. 179. С. 78–80.
14. Анахаев К.Н. О ротационном (вращательном) движении математического маятника // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462. № 4. С. 412–417.



15. Маркеев А.П. О маятнике на вращающемся и вибрирующем основании // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. №5. С. 542–546.
16. Шишкин В.М., Левашов А.П. Моделирование затухающих колебаний пластины с учетом амплитудно-зависимого рассеяния энергии в материале // *Advanced Science*. 2017. № 3 (7). С. 367–376.
17. Стец А.А. Аппроксимация затухающих колебаний крупногабаритных космических конструкций // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2021. № 3 (96). С. 64–76.
18. Бояркина И.В., Бояркин Г.Н. Математическое моделирование расчёта переходных процессов затухающих колебаний пневмоколеса // Строительные и дорожные машины. 2021. № 4. С. 8–13.
19. Попов И.П. Источники гармонической силы и скорости в мехатронных автоматических системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. № 22 (4). С. 208–216.
20. Молодцов Н.А., Петров С.П. Использование микроконтроллера для стабилизации скорости вращения ротора двигателя постоянного тока // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. 2021. № 10. С. 4–7.

### References

1. Popov I.P. Reaktansy i susceptansy mekhanicheskikh sistem [Reactances and susceptances of mechanical systems]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Bulletin of the Tomsk State University. Mathematics and mechanics], 2021, no. 70, pp. 64–75.
2. Pavlov V.D. Nakopitel' energii transportno-tehnologicheskoy mashiny s vozmozhnost'yu avtomaticheskogo upravleniya [Energy accumulator of a transport-technological machine with the possibility of automatic control]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2021, no. 2 (24), pp. 7–10.
3. Popov I.P. Elektromagnitnyi makhovik dlya oriyentirovaniya orbital'nykh ob'yektov [Electromagnetic flywheel for orientation of orbital objects]. *Oboronnyi kompleks – nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii* [Defense complex – scientific and technical progress of Russia], 2019, no. 2, pp. 15–17.
4. Pavlov V.D. Teoremy ob izluchenii zaryada [Theorems on charge radiation]. *Inzhenernaya fizika* [Engineering Physics], 2021, no. 6, pp. 37–40.
5. Vershinin A.S. Varianty postroyeniya vysokotochnykh sistem stabilizatsii skorosti vrashcheniya vala elektrodvigatelya postoyannogo toka [Options for constructing high-precision systems for stabilizing the speed of rotation of the DC motor shaft]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya S. Fundamental'nye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series C. Basic Sciences], 2020, no. 12, pp. 77–86.
6. Islomov I.I. Funktsional'naya skhema stabilizatsii chastoty vrashcheniya vetrogeneratora s ispol'zovaniyem elektromagnitnogo reduktora [Functional scheme for stabilizing the frequency of rotation of a wind generator using an electromagnetic gearbox]. *Energetik* [Power Engineer], 2017, no. 5, pp. 41–43.
7. Nikolayev V.T. Issledovaniye kompensatsionnoi skhemy stabilizatsii skorosti vrashcheniya miniyurnogo kollektornogo elektrodvigatelya postoyannogo toka [Investigation of the compensation scheme for stabilizing the rotation speed of a miniature collector DC motor]. *Elektronnyye informatsionnye sistemy* [Electronic information systems], 2021, no. 3(30), pp. 25–32.
8. Kayumov O.R. Optimal'noye po bystrodeistviyu peremeshchenie telezhki s mayatnikom [Speed-optimal movement of a trolley with a pendulum]. *Izvestiya Rossiyskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Bulletins of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2021, no. 1, pp. 30–41.
9. Gladkov S.O., Bogdanova S.B. Teoriya determinirovannogo khaosa v sisteme  $n$  vzaimodeistvuyushchikh komplanarnykh mayatnikov [Theory of deterministic chaos in a system of  $n$  interacting coplanar pendulums]. *Inzhenernaya fizika* [Engineering Physics], 2019, no. 3, pp. 9–21.
10. Popov I.P. Primeneniye simvolicheskogo (kompleksnogo) metoda dlya issledovaniya okolorezonansnykh yavlenii [Application of the symbolic (complex) method for the study of near-resonance phenomena]. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii* [Problems of mechanical engineering and automation], 2020, no. 4, pp. 145–153.
11. Gaysina G.A. Poryadok rosta ryada eksponent vblizi granitsy oblasti skhodimosti [The order of growth of a series of exponentials near the boundary of the convergence region]. *Algebra i analiz* [Algebra and Analysis], 2021, vol. 33, no. 3, pp. 31–50.
12. Belyaev V.A. O skhodimosti po diagonal'yam i absolyutnoy skhodimosti stepennykh ryadov s deystvitel'nymi koeffitsientami [On diagonal convergence and absolute convergence of power series with real coefficients]. *Elektronnyi zhurnal: nauka, tekhnika i obrazovanie* [Electronic journal: science, technology and education], 2019, no. 1 (23), pp. 98–107.
13. Timoshenko V.V. K skhodimosti v smysle Chezaro chislovykh ryadov [Convergence in the sense of Cesaro of numerical series]. *Itogi nauki i tekhniki. Sovremennaya matematika i ee prilozheniya. Tematicheskie obzory* [Results of science and technology. Modern mathematics and its applications. Thematic reviews], 2020, vol. 179, pp. 78–80.
14. Anakhayev K.N. O rotatsionnom (vrashchatel'nom) dvizhenii matematicheskogo mayatnika [On the rotational (rotational) motion of a mathematical pendulum]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2015, vol. 462, no. 4, pp. 412–417.
15. Markeev A.P. O mayatnike na vrashchayushemsya i vibriruyushchem osnovanii [About the pendulum on a rotating and vibrating base]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2017, vol. 477, no. 5, pp. 542–546.
16. Shishkin V.M., Levashov A.P. Modelirovaniye zatukhayushchikh kolebaniy plastiny s uchetom amplitudno-zavisimogo rasseyaniya energii v materiale [Modeling of damped oscillations of a plate taking into account the amplitude-dependent energy dissipation in the material]. *Advanced Science*, 2017, no. 3 (7), pp. 367–376.
17. Stets A.A. Approssimatsiya zatukhayushchikh kolebaniy krupnogaabaritnykh kosmicheskikh konstruksii [Approximation of damped oscillations of large space structures]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E.*

*Baumana. Seriya Estestvennye nauki* [Bulletin of the Moscow State Technical University named N.E. Bauman. Series Natural Sciences], 2021, no. 3 (96), pp. 64–76.

18. Boyarkina I.V., Boyarkin G.N. Matematicheskoe modelirovanie rascheta perekhodnykh protsessov zatukhayushchikh kolebaniy pnevmokolesa [Mathematical modeling of the calculation of transient processes of damped oscillations of the pneumatic wheel]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machines], 2021, no. 4, pp. 8–13.

19. Popov I.P. Istochniki garmonicheskikh sily i skorosti v mekhatronnykh avtomaticheskikh sistemakh [Sources of harmonic forces and speeds in mechatronic automatic systems]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2021, no. 22(4), pp. 208–216.

20. Molodtsov N.A., Petrov S.P. Ispol'zovaniye mikrokontrollera dlya stabilizatsii skorosti vrashcheniya rotora dvigatelya postoyannogo toka [Using a microcontroller to stabilize the rotor speed of a DC motor]. *KIP i avtomatika: obsluzhivanie i remont* [Instrumentation and automation: maintenance and repair], 2021, no. 10, pp. 4–7.

#### **Информация об авторах**

**Попов Игорь Павлович**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов, Курганский государственный университет, г. Курган; e-mail: ip.popov@yandex.ru.

#### **Information about the authors**

**Igor P. Popov**, Ph.D. in Engineering Science, Assistant Professor of the Department of Mechanical Engineering, Metal-Cutting Machines and Tools, Kurgan State University, Kurgan; e-mail: ip.popov@yandex.ru.

## Расчет тонкостенного уплотнения пониженной жесткости

Ю. И. Белоголов ✉

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

✉belogolov\_yi@irgups.ru

### Резюме

Многообразие встречающихся конструктивных решений с применением тонкостенных металлических уплотнений свидетельствует о заинтересованности арматуростроителей в соединениях такого типа. Как правило, в таких соединениях металлическое уплотнение имеет форму тонкостенной цилиндрической оболочки. Наряду с некоторыми преимуществами, недостатком уплотнения такого типа является чувствительность к условиям нагружения. При проектировании неизвестны размеры тонкостенной оболочки (толщина), а это означает, что неизвестна динамическая (ударная) нагрузка, возникающая при перекрытии потока рабочей среды в клапане. Экспериментальный подбор размеров тонкостенной оболочки связан со значительными финансовыми и временными затратами. Область рациональных размеров для тонкостенной оболочки при известных условиях эксплуатации достаточно узкая и может привести либо к потере прочности, либо к утрате положительных качеств (например, выбор отклонения формы) такого уплотнения. Одним из направлений совершенствования таких уплотнений является снижение приведенной жесткости оболочки. Конструктивно это может быть выполнено за счет соединения оболочки и пластины (оболочечно-пластинчатое седло), либо придания другой, более сложной геометрической формы. Однако отсутствие научных методик выбора рациональных геометрических размеров, особенно в условиях динамического (ударного) нагружения, сдерживает широкое применение таких уплотнений. Представленная статья посвящена вопросам выбора оптимальных геометрических размеров (толщины) при условии обеспечения прочности тонкостенного металлического уплотнения (оболочечно-пластинчатого) и сохранения положительных качеств, присущих соединениям «металл – полимер». С целью сокращения трудо-временных затрат расчет геометрических размеров тонкостенного уплотнения (толщины пластины и оболочки) был реализован и автоматизирован в MathCAD.

### Ключевые слова

клапан, упругая кромка, расчеты на прочность, определение рациональных размеров, напряженно-деформированное состояние, функции А.Н. Крылова, расчеты в MathCAD

### Для цитирования

Белоголов Ю.И. Расчет тонкостенного уплотнения пониженной жесткости / Ю.И. Белоголов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3(75). – С. 18–28. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).18-28.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 31.08.2022 г.; поступила после рецензирования: 21.09.2022 г.; принята к публикации: 22.09.2022 г.

## Calculation of a thin-walled seal of reduced stiffness

Yu. I. Belogolov ✉

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

✉belogolov\_yi@irgups.ru

### Abstract

The variety of occurring constructive solutions using thin-walled metal seals indicates the interest of valve manufacturers in joints of this type. As a rule, in such connections, the metal seal has the form of a thin-walled cylindrical shell. Along with a number of advantages, seals of this type are sensitive to loading conditions. When designing, the dimensions of the thin-walled shell are unknown (first of all, its thickness), which makes it impossible to determine the dynamic force that occurs when the valve is actuated. Experimental selection of the dimensions of a thin-walled shell is associated with significant financial and time costs. The area of rational dimensions for a thin-walled shell under certain operating conditions is quite narrow and can lead either to a loss of strength or to a loss of positive qualities (for example, the choice of shape deviation) by such a seal. One of the ways to improve such seals is to lower the reduced stiffness of the shell. Structurally, this can be done by connecting the shell and the plate (shell-plate saddle), or by giving it some other more complex geometric shape. However, the lack of scientific methods for choosing rational geometric dimensions, especially under conditions of dynamic (impact) loading, hinders the widespread use of such seals. The presented article is devoted to the issues of choosing the optimal geometric dimensions (thickness), provided that the strength of thin-walled metal seals (shell-plate) is ensured and the positive qualities inherent in metal-polymer compounds are preserved. In order to reduce labor and time costs, the calculation of the geometric dimensions of a thin-walled seal (plate and shell thickness) was automated in MathCAD.

**Keywords**

valve, elastic edge, strength calculations, determination of rational dimensions, stress-strain state, functions Krylova, calculations in PTC MathCAD

**For citation**

Belogolov Yu.I. Raschet tonkostennogo uplotneniya ponizhennoi zhestkosti [Calculation of a thin-walled seal of reduced stiffness]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 18–28. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).18-28.

**Article Info**

Received: August 31, 2022; Revised: September 21, 2022; Accepted: September 22, 2022

**Введение**

Совершенствование конструкций авиационной и космической техники невозможно без разработки новых элементов пневмогидравлической системы как неотъемлемой части летательного аппарата, оказывающей значительное влияние на его работоспособность. Это связано с переходом на новые виды топлива, прежде всего криогенные (жидкие водород, метан), расширением условий эксплуатации (температурный диапазон, повышение давления и расхода рабочей среды и т.п.), ростом требований по надежности и долговечности, ограничениями по габаритам и массе, ужесточением экологических требований.

Уплотнительные соединения (подвижные, неподвижные, периодического действия) являются важнейшими компонентами пневмогидравлических систем. Например, из 58 агрегатов пневмогидравлической системы двигательной установки ракеты V-2 32 – клапаны [1]. В [2] отмечено, что при эксплуатации гидравлических систем самолетов число отказов, связанных с потерей герметичности, составляет до 2/3 числа отказов всех авиационных систем. Около 60 % случаев выхода из строя узлов ракетных двигателей связаны с уплотнениями агрегатов.

В настоящее время в уплотнительных соединениях летательных аппаратов все более широкое распространение получает использование тонкостенных оболочечных элементов, выполненных, как правило, в виде оболочечных цилиндрических (реже – конических) элементов. Такие элементы при формировании уплотнительного стыка легко деформируются, принимая форму ответной детали. Простота формы оболочечного элемента обеспечивает высокую технологичность соединения.

Такие уплотнительные соединения могут быть использованы в разнообразных разъемных соединениях: клапанах, кранах (в том числе и в

шаровых), фланцах, штуцерах, стыковочных узлах и т.д. Материалы уплотнительных соединений – стали (в том числе нержавеющей), бронзы, латуни и т.п., что позволяет использовать соединения в агрессивных средах и в условиях термических воздействий.

Упругий оболочечный элемент имеет низкую изгибную жесткость, что обеспечивает уплотнительному соединению «металл – металл» сохранение всех преимуществ уплотнения «металл – полимер», позволяет соединить в нем лучшие черты двух типов уплотнений, особенно в тяжелых условиях работы, когда положительные качества соединения проявляются лучшим образом.

Одним из наиболее ранних изобретений, в котором используется оболочечный цилиндрический элемент, является шариковый клапан (авторское свидетельство 1968 г. № 272745) (рис. 1). Согласно формуле изобретения – «Шариковый клапан для жидкостей с малой вязкостью, содержащий внутри корпуса седло из упругого материала, шарик и пружину, отличающийся тем, что с целью повышения надежности и ресурса работы клапана седло выполнено в виде тонкостенной упругой металлической втулки, запрессованной в гнездо из полимерного упругого материала» [3]. Из формулы изобретения следует, что седло уплотнительного соединения представляет собой тонкостенный оболочечный элемент, золотник имеет форму шара, который под действием привода через пружину прижимается к седлу. Седло деформируется, приобретая необходимую геометрическую форму, что может компенсировать неточности при монтаже и сборке такого соединения. Следует отметить, что использование полимерного материала в качестве демпфирующего элемента снижает надежность уплотнительного соединения.

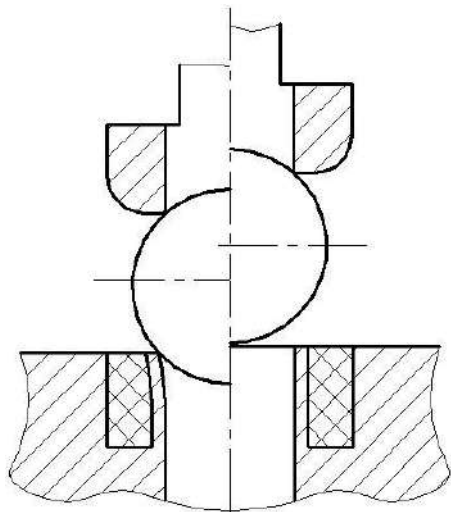


Рис. 1. Шариковый клапан  
Fig. 1. Ball valve

Наиболее ранним из обнаруженных уплотнительных соединений, где золотник имеет форму конуса, является клапан (авторское свидетельство № 430263, заявлено в 1971 г.) (рис. 2) [4]. Целью изобретения является повышение долговечности седла. Седло клапана выполнено в виде набора оболочечных элементов. Использование золотника конической формы и прокладки из полимерного материала, расположенной под седлом клапана, обеспечивает контакт затвора со всеми оболочечными элементами одновременно. Однако использование нескольких оболочечных элементов требует большего усилия для герметизации соединения.

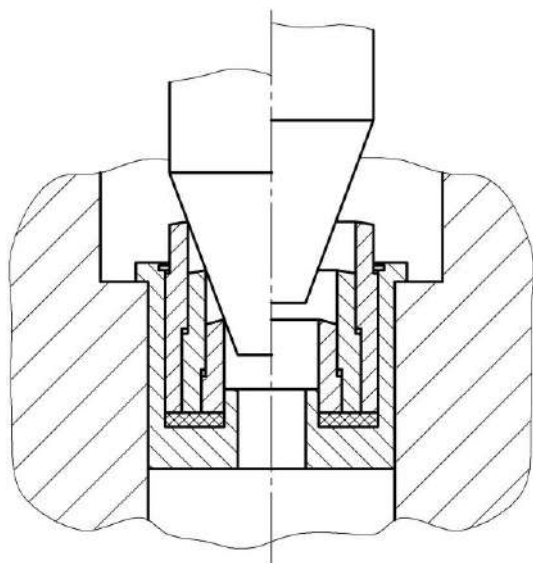


Рис. 2. Клапан  
Fig. 2. Valve

### Преимущества соединений с тонкостенными уплотнениями

В депонированной рукописи [5] приводится больше 70 изобретений отечественных и зарубежных авторов, посвященных применению тонкостенного элемента в качестве уплотнения, что означает заинтересованность арматуростроителей в уплотнительных соединениях такого типа.

К основным характеристикам уплотнительных соединений с тонкостенным оболочечным элементом:

- диаметры проходных сечений 10–1 000 мм;
  - давления рабочей среды (апробированные при испытаниях) от вакуума до 40,0 МПа;
  - рабочие температуры от криогенных до 600 °С;
  - ресурс (в зависимости от динамической ударной нагрузки) 20–300 тыс. циклов;
  - погонные усилия герметизации 5–15 Н/мм без учета усилия противодействия (общее усилие герметизации не превышает усилия при использовании полимерных уплотнителей, что позволяет применять, относительно других типов уплотнительных соединений «металл – металл», слабощелочной, компактный привод);
  - высокая надежность в условиях термодинамики.
- Основные преимущества уплотнительных соединений с тонкостенными элементами по сравнению с другими уплотнениями «металл – металл»:
- усилие герметизации (без компенсации противодействия) меньше в 5–15 раз;
  - равномерное распределение контактного давления по периметру в уплотнительном стыке;
  - устойчивость к внешним кинематическим воздействиям (удары, вибрация) из-за наличия позиционного трения в уплотнительном стыке;
  - не требуется притирки и доводки уплотнительного стыка;
  - минимальный расход материала для изготовления тонкостенного элемента;
  - малые динамические нагрузки при срабатывании клапана;
  - «самопритирка» уплотнительного стыка при каждом срабатывании клапана;
  - низкие требования к точности монтажа и сборке изделия.

В значительной мере широкое использование такого типа уплотнительных соединений в промышленности сдерживается отсутствием научно обоснованных методик определения рациональных геометрических размеров оболочечного элемента, работающего в условиях ударного нагружения [6–8]. Сложность расчетов связана прежде всего с тем, что неизвестны размеры оболочечного элемента, из чего следует, что нельзя установить динамическую ударную нагрузку, возникающую при ударном нагружении клапана, вследствие ее зависимости от жесткости уплотнения и, соответственно, определить модуль упругости и геометрические размеры этого уплотнения. Следует отметить, что при обеспечении наименьшей толщины оболочечного элемента, достигается:

1. Наименьшая динамическая ударная нагрузка на уплотнение, что ведет к уменьшению износа в уплотнительном стыке и, соответственно, повышению технических характеристик.

2. Снижение необходимого герметизирующего усилия, так как на выбор отклонений формы оболочечного элемента в уплотнительном стыке будет затрачена меньшая часть усилия привода [9–11].

Экспериментальный подбор размеров оболочечного элемента связан со значительными финансовыми и временными затратами. Область рациональных размеров для оболочечного цилиндрического элемента при известных условиях эксплуатации достаточно узкая. Выход из нее в одну сторону (недопустимое снижение толщины тонкостенного элемента) ведет к его пластическим деформациям и возможному разрушению. Выход из нее в другую сторону ведет к потере оболочечным элементом его положительных свойств.

В работах [12, 13] приводятся следующие пути обеспечения герметичности клапанных соединений:

- «совершенствование» поверхности микрорельефа путем доводки и притирки;
- минимизация микрозазоров за счет создания большей силы контактирования;
- применение эластомеров или пластичных материалов с целью заполнения микрозазоров;
- применение в качестве уплотнений гибких элементов, позволяющих компенсировать неровности поверхности уплотнения;

– использование расплавляемого (паяного) контакта;

– применение в клапанных соединениях различных жидкостей в качестве уплотнений.

Отметим, что напрямую на использование тонкостенных элементов указывает четвертый пункт, первый пункт реализуется при каждом срабатывании клапана с использованием оболочечного элемента, второй пункт реализуется из-за практического исключения из геометрических характеристик качества поверхности, определяющих микрозазоры, макроотклонений формы и волнистости, о чем говорилось ранее.

### Постановка задачи расчета геометрических размеров (толщины) тонкостенного уплотнения

В работах [14, 15] показано, что максимальная динамическая нагрузка  $F_{\max}$ , возникающая при срабатывании клапана с оболочечным седлом, определяется по формуле:

$$F_{\max} = F_{st} + \sqrt{F_{st}^2 + 2(E_k - E_{of})}(c_1 + c_2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)),$$

где  $F_{st}$  – статическая сила, действующая со стороны золотника на упругое седло при срабатывании клапана;  $E_k$  – кинетическая энергия приведенных к золотнику подвижных частей клапана;  $E_{of}$  – энергия, затрачиваемая на выбор отклонений формы оболочечного элемента;  $c_2$  – радиальная жесткость оболочечного элемента;  $\alpha$  – половина угла при вершине конуса золотника;  $\varphi$  – угол трения в уплотнительном стыке ( $\varphi = \operatorname{arctg} f$ ), где  $f$  – коэффициент трения.

Различные варианты определения толщины ударно нагруженного тонкостенного оболочечного элемента по заданной  $E_k$  приведены в [14–17].

При этом полагается, что радиус средней поверхности оболочечного элемента однозначно связан с условно-проходным диаметром, а длина его назначается из условия минимизации  $c_2$ .

Обсуждение вопросов, связанных со снижением энергии подвижных частей клапана  $E_k$ , приводится в работах [18–28].

Что касается  $c_2$ , то ее минимизация путем соответствующего выбора геометрических размеров при одновременном обеспечении прочности (так называемых рациональных размеров) может быть также выполнена конструкци-

онными методами, как например, указано в работах [12, 20, 23–29].

Согласно [12] седло может быть выполнено оболочечно-тороэдальным (рис. 3) или оболочечно-пластинчатым (рис. 4).

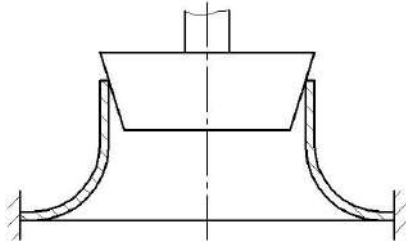


Рис. 3. Уплотнительное соединение с оболочечно-тороидальным седлом

Fig. 3. Sealing connection with shell-toroidal saddle

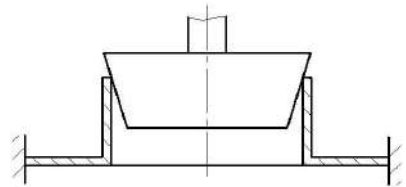


Рис. 4. Уплотнительное соединение с оболочечно-пластинчатым седлом

Fig. 4. Sealing connection with shell and plate saddle

Жесткостная модель для оболочечного седла показана на рис. 5, а оболочечно-пластинчатого седла на рис. 6. На этих рисунках  $c_1$  – жесткость привода;  $c_2$  – жесткость оболочечного элемента;  $c_3$  – жесткость пластинчатого элемента.

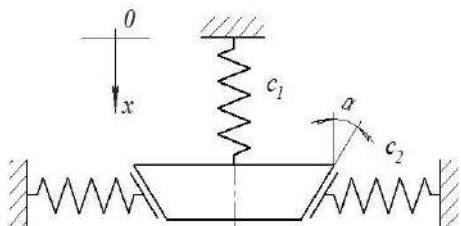


Рис. 5. Жесткостная модель оболочечного седла

Fig. 5. Rigidity model of a shell saddle

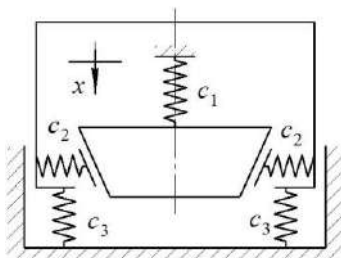


Рис. 6. Жесткостная модель оболочечно-пластинчатого седла

Fig. 6. Rigidity model of a shell-plate saddle

В случае с использованием оболочечно-пластинчатого седла,  $F_{\max}$  будет определяться из выражения:

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

Последний множитель в показанном выражении указывает на последовательное соединение жесткостей  $c_2$  и  $c_3$ , при котором эквивалентная жесткость меньше каждого из элементов  $c_2$  и  $c_3$ .

В дальнейшем оболочечно-пластинчатое седло будем рассматривать как технологически более простое. Расчетная схема уплотнения представлена на рис. 7. Методика расчета прочностных и жесткостных параметров оболочечного и пластинчатого элементов изложена в работах [12, 14]. Прочностной расчет выполняется дважды: в первом случае учитывается  $E_k$ , а во втором – золотник нагружает оболочечно-пластинчатое седло статически и седло нагружено давлением рабочей среды.

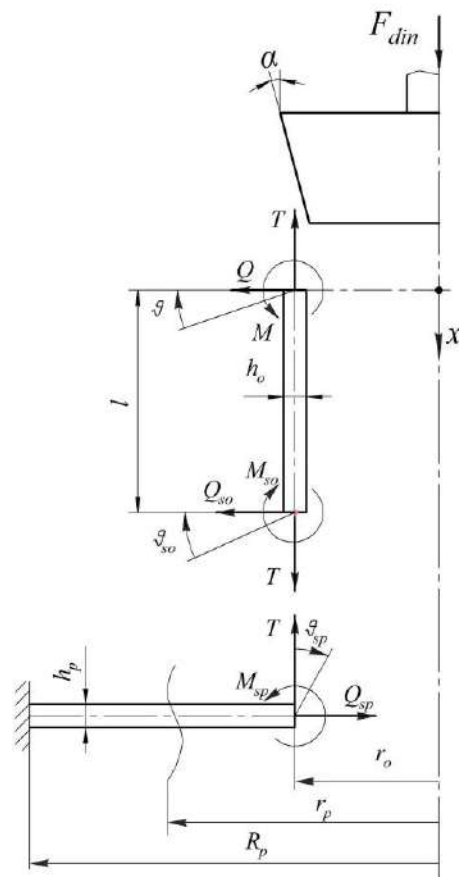


Рис. 7. Расчетная схема оболочечно-пластинчатого седла

Fig. 7. Calculation scheme of a shell-plate saddle

Возвращаясь к расчету оболочечно-пластинчатого седла следует отметить, что изменение напряженно-деформированного состояния оболочечного элемента влияет на напряженно-деформированное состояние пластинчатого и наоборот. Поэтому нельзя рассматривать отдельно оболочечный и пластинчатый элементы, толщины  $h_o$  и  $h_p$ , необходимо определять одновременно, а не по отдельности.

В общем случае  $h_o$  аналитически не может быть получено принудительно, так как решение дифференциального уравнения прогибов оболочечного элемента содержит толщину, входящую одновременно в тригонометрические и экспоненциальные функции, которые, как известно, являются простыми. Поэтому задача нахождения рациональных размеров оболочечно-пластинчатого элемента, а именно  $h_o$  и  $h_p$ , является оптимизационной, т.е. требуется подобрать значения  $h_o$  и  $h_p$ , обеспечивающие минимальное значение приведенной жесткости уплотнительного соединения при условии неперевышения экстремальных значений напряжений в оболочечном и пластинчатом элементах допускаемого.

### Решение задачи оптимального проектирования в среде MathCAD

Для постановки и решения задачи поиска оптимальных геометрических размеров рассматриваемого оболочечно-пластинчатого седла была разработана программа [12]. Результаты расчетов приведены на рис. 8–15. Для удобства программа в [12] представлена в виде алгоритма, состоящего из трех частей. Последовательность определения параметров в первой и третьей частях алгоритма для клапанного и фланцевого уплотнительных соединений одинаковые. В первой части алгоритма (жесткостной расчет) задаются исходные данные, определяются функции А.Н. Крылова и другие параметры. Давление рабочей среды, в случае расчета фланцевого уплотнительного соединения или при проверочном расчете клапанного, задается в исходных данных и учитывается в выражениях, согласно разработанной аналитической методике. Первая часть алгоритма заканчивается заданием жесткостей для пластинчатого и оболочечного элементов.

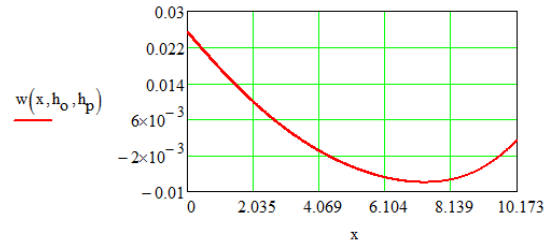


Рис. 8. Радиальное смещение в оболочечном элементе  
Fig. 8. Radial offset in shell element

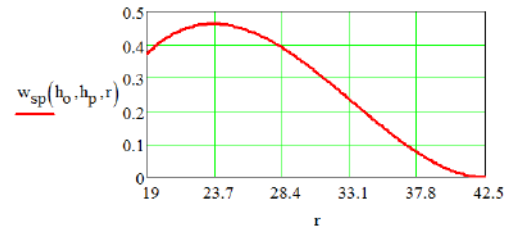


Рис. 9. Осевое перемещение в пластинчатом элементе  
Fig. 9. Axial movement in the plate element

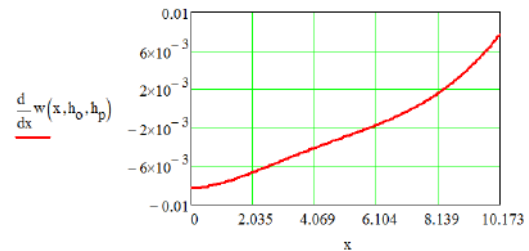


Рис. 10. Угол поворота в оболочечном элементе  
Fig. 10. Angle of rotation in the shell element

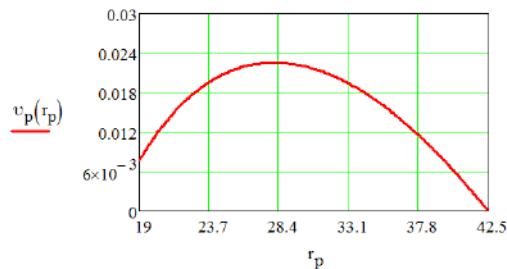


Рис. 11. Угол поворота в пластинчатом элементе  
Fig. 11. Angle of rotation in the plate element

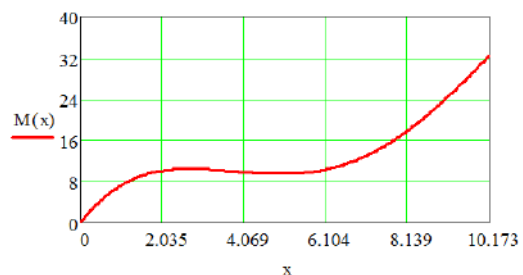


Рис. 12. Изгибающий момент в оболочечном элементе  
Fig. 12. Bending moment in the shell element



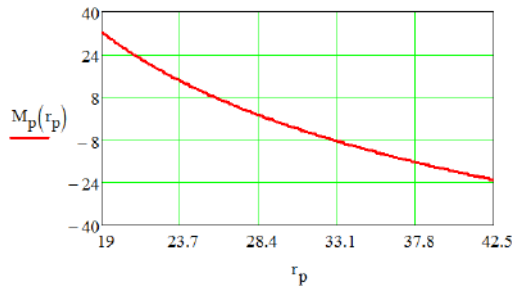


Рис. 13. Изгибающий момент в пластинчатом элементе

Fig. 13. Bending moment in a plate element

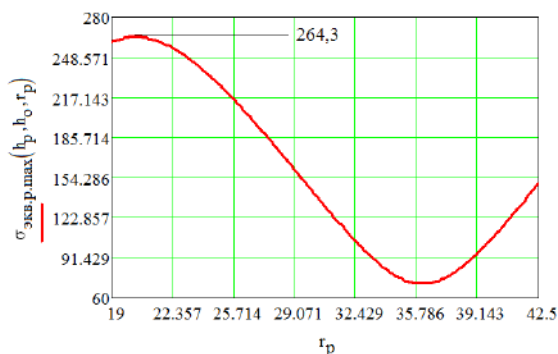


Рис. 14. Эквивалентные напряжения в пластинчатом элементе

Fig. 14. Equivalent stresses in a plate element

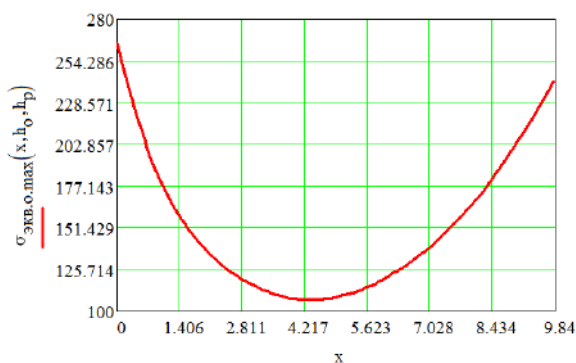


Рис. 15. Эквивалентные напряжения в оболочечном элементе

Fig. 15. Equivalent stresses in the shell element

Во второй части алгоритма (прочностной расчет) определяются: максимальная динамическая нагрузка  $F_{max}$  и внешние динамические параметры. Жесткостные параметры и параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) переопределяются. Вторая часть алгоритма заканчивается определением эквивалентных напряжений для пластинчатого и оболочечного элементов. В случае расчета фланцевого уплотнительного соединения, где отсутствует динамическая нагрузка  $F_{max}$ , после пер-

вой части алгоритма сразу определяются эквивалентные напряжения для пластинчатого и оболочечного элементов. В этом случае переопределение жесткостных параметров и параметров НДС не требуется.

В третьей части алгоритма проводится расчет рациональных геометрических размеров тонкостенного оболочечно-пластинчатого седла путем решения поставленных задач оптимизации для клапанного и фланцевого уплотнительных соединений. Задаются исходные параметры для подпрограмм. Эквивалентные напряжения для пластинчатого и оболочечного элементов задаются как функции от радиуса  $r$  и координаты  $x$ . Это было сделано для того, чтобы подпрограммы согласно заданным шагам производили поиск максимальных напряжений и соответствующих им текущих координаты  $x$  и радиуса  $r_p$ .

Полученные результаты расчета толщин  $h_o$ ,  $h_p$  (рис. 16) после вычислительного блока Given – minimize проходят проверку по допустимым напряжениям. В случае невыполнения этих условий значения радиуса  $r_{max,p}$  и координаты  $x_{max,o}$  снова анализируются подпрограммами и передаются в вычислительный блок Given – minimize для повторного расчета.

Для численных расчетов в РТС MathCAD [30, 31] были приняты следующие исходные данные:

1. Радиус срединной поверхности оболочечного элемента  $r_o = 19$  мм.
2. Наружный радиус пластины  $R_p = 42,5$  мм.
3. Модуль упругости материала  $E = 90\,000$  МПа.
4. Коэффициент Пуассона материала  $\mu = 0,35$ .
5. Половина угла при вершине конуса золотника  $\alpha := \frac{\pi}{12}$ .
6. Коэффициент трения в стыке  $f = 0,1$ ;  $\varphi := \text{atan}(f)$ .
7. Параметр оболочечного элемента (рекомендуется  $2 \leq \beta_1 \leq 3$ )  $\beta_1 = 3$ .
8. Нагрузка со стороны привода  $F_{st} = 450$  Н.
9. Кинетическая энергия подвижных частей клапана в момент соударения (Н·мм)  $E_k = 100$ .
10. Осевая нагрузка  $T_{st} = -\frac{F_{st}}{2 \cdot \pi \cdot r_o}$  и ра-

диальная  $Q_{st} = -\frac{T_{st}}{\tan(\alpha + \varphi)}$ .

11. Предел текучести (упругости)  $\sigma_{adm} = 260$  МПа.

В качестве материала, из которого изготовлено оболочечно-пластинчатое седло, принята бронза БрО5Ц5С5. Кроме того, в качестве начальных приближений приняты толщины оболочки и пластины  $h_o = 1$  мм и  $h_p = 1$  мм соответственно. После проведения расчетов в MathCAD были получены: начальные приближения  $r_{max,p} = 19$  и  $x_{max,o} = 10,173$ ; рациональные геометрические размеры (толщины):  $h_o = 0,936$  мм;  $h_p = 1,719$  мм.

После выполнения расчета и получения результатов рациональных толщин для седла, необходимо провести проверку начальных приближений, так как возможно невыполнение условий по допускаемым напряжениям. Это происходит потому, что вычислительный блок Given (в данном случае Given-minimize), ограничен начальными приближениями и выполняет заданные ограничения по допускаемым напряжениям только в них. На рис. 14 показано, что значение эквивалентных напряжений превышает допускаемое  $\sigma_{adm} = 260$  МПа, при  $r_{max,p} = 20,3$  эквивалентные напряжения  $\sigma_{экр.р.макс}(h_o, h_p, 20,3) = 264,3$  МПа. В результате проверки начальных приближений и повторного расчета были уточнены рациональные геометрические размеры (толщины):  $h_o = 0,945$  мм;  $h_p = 1,743$  мм.

После уточнения рациональных геометрических размеров (толщины) в PTC MathCAD была сформирована табл. для участка 19,17–19,5 мм с максимальными напряжениями в пластинчатом элементе с целью проверки.

Эквивалентные напряжения в пластинчатом элементе на отрезке 19,17–19,50 мм  
Equivalent stresses in the plate element on the segment 19,17 – 19,5 mm

Радиус пластинчатого элемента Plate element radius	Эквивалентные напряжения Equivalent stresses $\sigma_{экр.р.макс}(h_o, h_p, r_p)$
19,5	258,023
19,6	258,455
19,7	258,832
19,8	259,154
19,9	259,423
19,10	259,639
19,11	259,803
19,12	259,917
19,13	259,982

19,14	259,999
19,15	259,968
19,16	259,89
19,17	259,768

Условия по допускаемым напряжениям для пластинчатого и оболочечного элементов выполняются.

Графики эквивалентных напряжений в пластинчатом и оболочечном элементах представлены на рис. 16. Из графиков видно, что условия по допускаемым напряжениям выполняются.

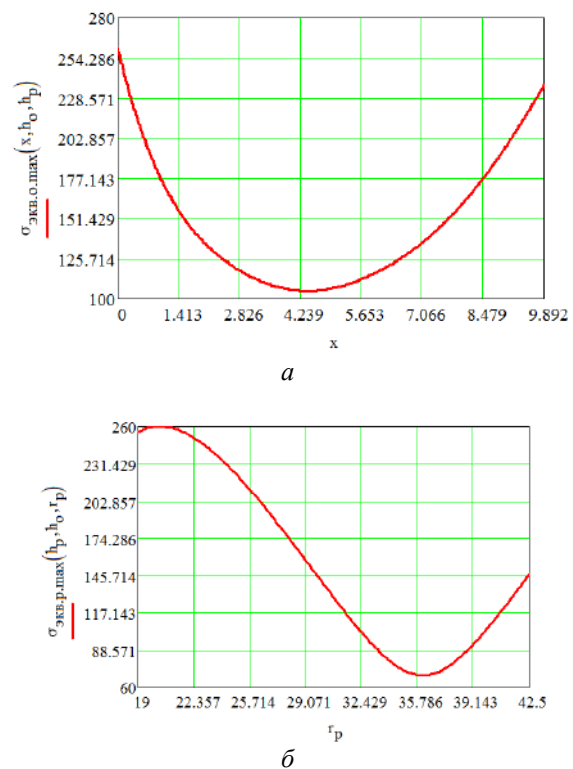


Рис. 16. График эквивалентных напряжений: а – в оболочке; б – в пластине

Fig. 16. Equivalent stress graph: a – in the shell; b – in the plate

## Заключение

Использование автоматизированных систем расчета позволяет значительно сократить время решения задачи. Встроенные в систему функции программирования дают возможность создавать несложные программные модули [32], необходимые для многократных вычислений, например, для поиска координаты  $x_{max,o}$  и радиуса  $r_{max,p}$ , используемых при дальнейших расчетах в качестве начальных приближений для вычислительного блока Given-minimize [33–35].

Рациональные размеры оболочечного и пластинчатого элементов обеспечивают минимально возможное значение приведенной жесткости уплотнительного соединения принятой схемы, что, во-первых, обеспечивает минимизацию усилия герметизации за счет энергетических (силовых) затрат на выбор отклонений формы; во-вторых, минимизирует динамическую нагрузку при срабатывании клапана, что положительно скажется на его ресурсе ввиду минимизации износа соединения при каждом срабатывании клапана.

Дальнейшее совершенствование уплотнительных соединений с тонкостенными элементами (упругой кромкой) может быть связано с разработкой инженерных подходов и последующих расчетов уплотнений пониженной жесткости более сложной геометрической формы (тороидальной, сильфонной и др.). Использование конструктивных решений с целью компенсации давления рабочей среды на подвижные части затвора позволит свести к минимуму такое воздействие.

### Список литературы

1. Пневмогидравлические системы двигательных установок с ЖРД. М. : Машиностроение, 1978. 240 с.
2. Чегодаев Д.Е., Мулюкин О.П. Гидропневмотопливные агрегаты и их надежность. Куйбышев : Куйбыш. кн. изд-во, 1990. 104 с.
3. А. с. 272745 СССР. Шариковый клапан / В. И. Подпружников, А.Н. Поляков. № 1220601/25-8 ; заявл. 26.11.68 ; опубл. 03.06.70, Бюл. № 19. 2 с.
4. А. с. 430263 СССР. Клапан / И. К. Попов (СССР). № 1671676/25-8 ; заявл. 21.06.71 ; опубл. 30.05.74, Бюл. № 20. 2 с.
5. Герметичность затворов трубопроводной арматуры и оборудования с элементами пониженной жесткости / П.М. Огар, В.А. Тарасов, Д.Б. Горохов и др. // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 2. С. 11–14.
6. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.К. Ефремов и др. М. : Машиностроение, 1977. 240с.
7. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. М. : Машиностроение, 1974. 486 с.
8. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. М. ; Л. : Гостехиздат, 1949. 784 с.
9. Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры. Л. : Машиностроение, 1969. 887с.
10. Гуревич Д.Ф., Заринский О.Н., Щучинский Д.Ф. Эксплуатация приводов арматуры на химических предприятиях. Л. : Химия, 1985. 360 с.
11. Гуревич Д.Ф., Ширяев В.В., Пайкин И.Х. Арматура для атомных электростанций. М. : Энергоатомиздат, 1982. 312 с.
12. Долотов А.М. Разработка методов расчета и проектирование уплотнений с оболочечным элементом для летательных аппаратов : дис. ... д-ра. тех. наук. М., 1994. 280 с.
13. Герасимов С.В., Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Математическая модель динамического нагружения двухседельного клапана // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 126–129.
14. Долотов А.М., Огар П.М., Чегодаев Д.Е. Основы теории и проектирования уплотнений пневмогидроарматуры летательных аппаратов. М. : Изд-во МАИ, 2000. 296 с.
15. Определение коэффициента трения в уплотнительном стыке с оболочечным элементом / А.М. Долотов, С.И. Ермашонок, С.А. Пронькина и др. // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки - развитию регионов Сибири. 2011. Т. 2. С. 80-82.
16. О применимости стандартов для оценки герметичности затворов трубопроводной арматуры / В.К. Погодин, К.А. Кузнецов, Н.А. Верховин и др. // Химическая техника. 2013. № 2. С. 32.
17. Белоголов Ю.И. Компенсация усилий, действующих на затвор со стороны герметизируемой среды // Проблемы транспорта Восточной Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Иркутск : ИрГУПС, 2012. С. 124–128.
18. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Обзор способов разгрузки золотника клапана от давления герметизируемой среды // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 3 (7). С. 30–36.
19. Пат. 2516994 Рос. Федерация. Разгруженный клапан / Ю.И. Белоголов, А.М. Долотов, П.М. Огар. № 2012150424/06 ; заявл. 27.11.2012 ; опубл. 27.05.2014, Бюл. № 15. 4 с.
20. Уплотнения и уплотнительная техника / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер и др. М. : Машиностроение, 1986. 464 с.
21. Кармугин Б.В., Стратиневский Г.Г., Мендельсон Д.А. Клапанные уплотнения пневмогидроагрегатов. М. : Машиностроение, 1983. 152 с.
22. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Снижение динамических нагрузок при ударном нагружении оболочечного седла клапана // Проблемы транспорта Восточной Сибири : сб. тр. конф. Т. 2. Иркутск : ИрГУПС, 2011. С. 145–148.
23. Гошко А.И. Арматура трубопроводная целевого назначения. Ч. 1: Выбор. Эксплуатация. Ремонт. М. : Машиностроение, 2003. 423 с.
24. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин. М. : Машиностроение, 1973. 456 с.
25. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. М. : Машиностроение, 1993. 640 с..
26. Долотов А.М., Зацарный В.А. Расчет жесткости упругих затворов // Вестн. Львов. политехн. ин-та. 1983. № 170. С. 65–66.

27. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Определение перемещений в оболочечно-пластинчатом седле клапана // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 2 (18). С. 22–28.
28. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Определение жесткостных характеристик оболочечно-пластинчатого седла клапана // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2013. № 3 (37). С. 32–37.
29. Расчеты на прочность в машиностроении / Под ред. С.Д. Пономарева. М. : Машгиз. 1956-1959. 3 т.
30. Щучинский С. Х. Клапаны с электромагнитным приводом. М. : Энергоатомиздат, 1988. 152 с.
31. Трубопроводная арматура с автоматическим управлением / Д.Ф. Гуревич и др. Л. : Машиностроение, 1982. 320 с.
32. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad 15. СПб. : Питер, 2011. 399 с.
33. Максфилд Б. Mathcad в инженерных расчетах. Киев ; Санкт-Петербург : МК-Пресс ; Корона-Век, 2010. 368 с.
34. Габдуллина О.Г., Никонорова О.А., Бикмухаметова Э.И. Решение функциональных и вычислительных задач в средах Delphi и MathCAD. Оренбург : ОГУ, 2005. 114 с.
35. Ушаков, А.Н., Ушакова Ю.Н. Секреты MathCAD для инженерных и научных расчетов. Оренбург : ОГУ, 2001. 122 с.

### References

1. Pnevmodgidravlicheskie sistemy dvigatel'nykh ustanovok s ZHRD [Pneumohydraulic systems of propulsion systems with LRE]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 240 p.
2. Chegodaev D.E., Mulyukin O.P. Gidropnevomotoplivnye agregaty i ikh nadezhnost' [Hydro-pneumatic fuel units and their reliability]. Kuibyshev: Knizhnoe izdatel'stvo Publ., 1990. 104 p.
3. Podpruznikov V.I., Polyakov A.N. Copyright certificate SU 272745 A1, 06.03.1970.
4. Popov I.K. Copyright certificate SU 430263, 30.05.74.
5. Ogar P.M., Tarasov V.A., Gorokhov D.B., Bayev A.O. Germetichnost' zatvorov truboprovodnoy armatury i oborudovaniya s elementami ponizhennoy zhestkosti [Tightness of closures of pipeline fittings and equipment with elements of reduced rigidity]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i inzhenernyye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences], 2013, vol. 2, pp. 11–14.
6. Batuev G.S., Golubkov Yu.V., Efremov A.K. [et al.]. Inzhenernyye metody issledovaniya udarnykh protsessov [Engineering methods for studying shock processes]. Moscow: Mashinostroenie, 1977. 240p.
7. Biderman V.L. Mekhanika tonkostennykh konstruksii [Mechanics of thin-walled structures]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1974. 486 p.
8. Vlasov V.Z. Obshchaya teoriya obolochek i ee prilozheniya v tekhnike [General theory of shells and its applications in engineering]. Moscow; Leningrad: Gostekhizdat Publ., 1949. 784 p.
9. Gurevich D.F. Raschet i konstruirovaniye truboprovodnoi armatury [Calculation and design of pipeline fittings]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1969. 887 p.
10. Gurevich D.F., Zarinskii O.N., Shchuchinskii D.F. Eksploatatsiya privodov armatury na khimicheskikh predpriyatiyakh [Operation of valve actuators at chemical enterprises]. Leningrad: Khimiya Publ., 1985. 360 p.
11. Gurevich D.F., Shiryaev V.V., Paikin I.Kh. Armatura dlya atomnykh elektrostantsii [Fittings for nuclear power plants]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1982. 312 p.
12. Dolotov A.M. Razrabotka metodov rascheta i proektirovaniye uplotnenii s obolochechnym elementom dlya letatel'nykh apparatov [Development of calculation methods and design of seals with a shell element for aircraft]. Doctor's thesis, Moscow, 1994. 280 p.
13. Gerasimov S.V., Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Matematicheskaya model' dinamicheskogo nagruzheniya dvukhsedel'nogo klapana [Mathematical model of dynamic loading of a two-seated valve]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i inzhenernyye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences], 2012, vol. 1, pp. 126–129.
14. Dolotov A.M., Ogar P.M., Chegodaev D.E. Osnovy teorii i proyektirovaniya uplotneniy pnevmogidroarmatury letatel'nykh apparatov [Fundamentals of the theory and design of seals for aircraft pneumohydraulic fittings]. Moscow: MAI Publ., 2000. 296 p.
15. Dolotov A.M., Yermashonok S.I., Pron'kina S.A., Gerasimov S.V. Opredeleniye koeffitsiyenta treniya v uplotni-tel'nom styke s obolochechnym elementom [Determination of the coefficient of friction in the sealing joint with the shell element]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i inzhenernyye nauki - razvitiyu regionov Sibiri* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences – for development of region of Siberia], 2011, vol. 2, pp. 80–82.
16. Pogodin V.K., Kuznetsov K.A., Verkhosin N.A., Ogar P.M., Mukhin S.V., Dolotov A.M. O primenimosti standartov dlya otsenki germetichnosti zatvorov truboprovodnoy armatury [On the applicability of standards for assessing the tightness of pipeline valves]. *Khimicheskaya tekhnika* [Chemical engineering], 2013, no. 2, p. 32.
17. Belogolov Yu.I. Kompensatsiya usilii, deistvuyushchikh na zatvor so storony germetiziruemoi sredy [Compensation for the efforts acting on the shutter from the side of the sealed medium]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Problemy transporta Vostochnoi Sibiri»* [Proceedings of All-Russian scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students «Problems of transport of Eastern Siberia»]. Irkutsk, 2012, pp. 124–128.
18. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Obzor sposobov razgruzki zolotnika klapana ot davleniya germetiziruemoi sredy [Review of methods for unloading the valve spool from the pressure of the sealed medium]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technology], 2010, no. 3 (7), pp. 30–36.
19. Belogolov Yu.I., Dolotov A.M., Ogar P.M. Patent RU 2516994 C1, 27.05.2014.
20. L.A. Kondakov, A.I. Golubev, V.B. Ovander, V.V. Gordeev, B.A. Furmanov, B.V. Karmugin. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika [Seals and sealing engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986. 464 p.

21. Karmugin B.V., Stratinevskii G.G., Mendel'son D.A. Klapannye uplotneniya pnevmogidroagregatov [Valve seals of pneumohydraulic units]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 152 p.
22. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Snizhenie dinamicheskikh nagruzok pri udarnom nagruzhении obolochecnogo sedla klapana [Reduction of dynamic loads during shock loading of the valve shell seat]. *Sbornik trudov konferentsii «Problemy transporta Vostochnoi Sibiri»* [Proceedings of the conference «Problems of Transport in Eastern Siberia»]. Irkutsk, 2011, vol. 2, pp. 145–148.
23. Goshko A.I. Armatura truboprovodnaya tselevogo naznacheniya (V 3-kh ch.). Ch. 1: Vybor. Eksploatatsiya. Remont [Pipeline fittings for special purposes (In 3 vol.). Vol. 1: Choice. Exploitation. Repair]. M.: Mashinostroenie, 2003. 423 p.
24. Boyarshinov S.V. Osnovy stroitel'noi mekhaniki mashin [Fundamentals of structural mechanics of machines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1973. 456 p.
25. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. Raschet na prochnost' detalei mashin [Calculation for the strength of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1993. 640 p.
26. Dolotov A.M., Zatsarnyi V.A. Raschet zhestkosti uprugikh zatvorov [Calculation of the rigidity of elastic gates]. *Vestnik L'vovskogo politekhnicheskogo instituta* [Bulletin of the Lviv Polytechnic Institute], 1983, no. 170, pp. 65 – 66.
27. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Opredelenie peremeshchenii v obolochenchno-plastinchatom sedle klapana [Determination of displacements in the shell-plate valve seat]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technology], 2013, no. 2 (18), pp. 22–28.
28. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Opredelenie zhestkostnykh kharakteristik obolochечно-plastinchatogo sedla klapana [Determination of the stiffness characteristics of the shell-plate valve seat]. *Truboprovodnyi transport: teoriya i praktika* [Pipeline transport: theory and practice], 2013, no. 3 (37), pp. 32 – 37.
29. Raschety na prochnost' v mashinostroenii (V 3 t.) [Calculations for strength in engineering (In 3 vol.)]. Ed. Ponomarev S.D. Moscow: Mashgiz Publ., 1956-1959.
30. Shchuchinskii S.Kh. Klapany s elektromagnitnym privodom [Valves with electromagnetic drive]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1988. 152 p.
31. Gurevich D.F. [et al.]. Truboprovodnaya armatura s avtomaticheskim upravleniem [Pipe fittings with automatic control]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1982. 320 p.
32. Makarov E.G. Inzhenernye raschety v Mathcad 15 [Engineering calculations in Mathcad 15]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2011. 399 p.
33. Maxfield B. Mathcad v inzhenernykh raschetakh [Mathcad in engineering calculations]. Kiev, Saint Petersburg: MK-Press Publ., Korona-Vek Publ., 2010. 368 p.
34. Gabdullina O.G., Nikonorova O.A., Bikmukhametova E.I. Reshenie funktsional'nykh i vychislitel'nykh zadach v sredakh Delphi i MathCAD [Solution of functional and computational problems in Delphi and MathCAD environments]. Orenburg: OGU Publ., 2005. 114 p.
35. Ushakov A.N., Ushakova N.Yu. Sekrety MathCAD dlya inzhenernykh i nauchnykh raschetov [Secrets of MathCAD for engineering and scientific calculations]. Orenburg: OGU Publ., 2001. 122 p.

**Информация об авторе**

**Белоголов Юрий Игоревич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: belogolov\_yi@irgups.ru.

**Author**

**Yurii I. Belogolov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: belogolov\_yi@irgups.ru.

## Квазианалитический метод решения дифференциальных уравнений электромашинных вентильных систем

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

В теории электрических машин наметилась тенденция к применению строгих в математическом смысле методов приведения периодических систем к системам уравнений с постоянными коэффициентами. В статье на основе модифицированного метода приведения систем с периодическими коэффициентами к системам с постоянными коэффициентами предложен численно-аналитический метод построения упрощенных математических моделей многофазных вентильных машин. Численно-аналитические расчеты, проводимые с помощью данного метода, учитывают нестационарные свойства периодических систем уравнений вентильной машины и справедливы при анализе электромеханических процессов в широком диапазоне изменения частот вращения ротора. Если известны алгоритм работы ключей и топология схем замещения, то для каждой схемы замещения можно составить систему дифференциальных уравнений минимального порядка (по числу проводящих вентилей) и затем решать ее до того момента времени, пока состояние одного из вентилей схемы не изменится. «Сливание» решений дифференциальных уравнений, соответствующих различным межкоммутационным интервалам, осуществляется обычным методом припасовывания. Такой подход получил название метода переменной структуры и применяется при исследовании нормальных эксплуатационных режимов работы вентильного синхронного генератора, когда последовательность образования схем замещения заранее определена из предшествующих результатов натурального эксперимента, либо путем математического моделирования на электронно-вычислительной машине с помощью универсальных математических моделей. Предлагаемый метод рекомендуется применять, например, при анализе и синтезе регуляторов напряжения, а также для сравнения полученных результатов с результатами численных экспериментов на основе моделирующих программ более высокого уровня.

### Ключевые слова

математическая модель, многофазные вентильные машины, электромеханические процессы электромашинных вентильных систем

### Для цитирования

Данеев А.В. Квазианалитический метод решения дифференциальных уравнений электромашинных вентильных систем / А.В. Данеев, Р.А. Данеев, В.Н. Сизых, А.П. Хоменко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3(75). – С. 29–37. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).29-37.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 7.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 13.09.2022 г.; принята к публикации: 14.09.2022 г.

## Quasi-analytical method for solution of differential equations of electric machine valve systems

A.V. Daneev<sup>1</sup>✉, R.A. Daneev<sup>2</sup>, V.N. Sizykh<sup>1</sup>, A.P. Khomenko<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 Russian Federation, Irkutsk, the Russian Federation

✉daneev@mail.ru

### Abstract

In the theory of electrical machines, there has been a tendency to use mathematically rigorous methods for reducing periodic systems to systems of equations with constant coefficients. Based on a modified method for reducing systems with periodic coefficients to those with constant coefficients, a numerical-analytical method for constructing simplified mathematical models of multiphase valve machines is proposed. Numerical-analytical calculations carried out using this method take into account the non-stationary properties of periodic systems of valve machine equations and are valid when analyzing electromechanical processes in a wide range of rotor speeds. With the algorithm of the keys and the topology of the equivalent circuits known, for each equivalent circuit it is possible to compose a system of differential equations of the minimum order (according to the number of conductive valves) and then solve it until the state of one of the circuit's valves changes. The "merging" of solutions of differential equations corresponding to different switching intervals is carried out by the usual method of fitting. This approach is called the variable structure method and is used in the study of normal operating modes of operation of a valve synchronous generator, when the sequence of formation of equivalent circuits is predetermined from the previous results of a full-scale experiment, or by

mathematical modeling on a computer using universal mathematical models. The proposed method is recommended to be used, for example, in the analysis and synthesis of voltage regulators, as well as for comparing the results obtained with the results of numerical experiments based on higher-level modeling programs.

### Keywords

mathematical model, multiphase valve machines, electromechanical processes

### For citation

Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N., Khomenko A.P. Kvazianaliticheskiy metod postroyeniya uproshchennykh matematicheskikh modelei ventil'nykh sinkhronnykh mashin [Quasi-analytical method for solution of differential equations of electric machine valve systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 29–37. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).29-37.

### Article Info

Received: September 7, 2022; Revised: September 13, 2022; Accepted: September 14, 2022

### Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется решению задач математического моделирования синхронных машин (СМ). При этом возникают вопросы, связанные с выбором рациональных форм представления моделей и рекомендациями по их практическому применению для исследования различных режимов работы СМ. В известной литературе эти вопросы, как правило, рассматриваются недостаточно полно. То же самое можно отнести к расчету вентильных синхронных машин (ВМ).

Анализ переходных процессов в ВМ может быть выполнен по математическим моделям (ММ), полученным в различных системах координат. Такие модели могут быть составлены на основе уравнений с периодическими коэффициентами, записанных относительно мгновенных значений переменных. Непреобразованные уравнения позволяют достаточно просто учесть все виды несимметрии фаз и нагрузки. Кроме того, увеличение числа фаз ( $a$ , следовательно, и числа дифференциальных уравнений) не усложняет расчет электромагнитных переходных процессов на электронно-вычислительных машинах (ЭВМ).

Следует отметить, что решение периодических систем на ЭВМ приводит к большим затратам машинного времени. Поэтому на практике применяют различные методы преобразования координат, позволяющие избавиться от периодических коэффициентов.

При моделировании многофазных СМ наибольшее распространение получило преобразование к вращающимся осям  $d, q, 0$ . Однако, если для трехфазных СМ переход к системе с постоянными коэффициентами не вызывает существенных затруднений, то иначе дело об-

стоит с приведением исходных уравнений шестифазной СМ.

Известен подход, что на основе матрицы симметричных составляющих получены обобщенные на случай многофазной СМ линейные преобразования [1, 2]. При этом для обмотки СМ с четным числом фаз элементы матрицы преобразования являются мнимыми величинами.

В то же время существует вещественное преобразование к системе уравнений с постоянными коэффициентами за счет приведения соответствующих фаз статорной обмотки СМ к различным координатным осям ( $d, q$  и  $2\alpha, 2\beta$ ).

Таким образом, отсутствие единого подхода к математическому описанию шестифазной СМ уравнениями с постоянными коэффициентами приводит к необходимости разработки новых методов математического моделирования СМ.

В настоящее время в теории электрических машин наметилась тенденция к применению строгих в математическом смысле методов приведения периодических систем к системам уравнений с постоянными коэффициентами [1, 2]. В работе [3] был предложен модифицированный метод приведения и получены матрица постоянных коэффициентов  $B$  и матрица преобразования  $V(t)$  в замкнутой аналитической форме:

$$B = \frac{1}{T} \int_0^T A(\tau) d\tau, \quad (1)$$

$$V(t) = \exp \left[ \int_0^t \{A(\tau) - B\} d\tau \right], \quad (2)$$

или с учетом первых двух слагаемых в матричном ряде Тейлора:

$$V(t) = E + \int_0^t \{A(\tau) - B\} d\tau, \quad (3)$$

где  $A(t)$  – матрица периодических коэффициентов.

### Постановка задачи

На основе полученных в работах [4, 5] уравнений состояния вентильного магнитоэлектрического генератора (МЭГ) с однополупериодными и мостовыми схемами выпрямления покажем возможность применения данного метода к разработке упрощенных математических моделей.

Главное допущение при составлении упрощенных ММ вентильного МЭГ – представление вентилей идеальными ключами [6]. При этом расчет переходных процессов сводится к последовательному анализу ряда линейных схем замещения ВМ.

Если известны алгоритм работы ключей и топология схем замещения, то для каждой схемы замещения можно составить систему дифференциальных уравнений минимального порядка (по числу проводящих вентилей) и затем решать ее до того момента времени, пока состояние одного из вентилей схемы не изменится. «Сливание» решений дифференциальных уравнений, соответствующих различным межкоммутационным интервалам, осуществляется обычным методом припасовывания [7, 8]. Такой подход получил название метода переменной структуры [6–8] и применяется при исследовании нормальных эксплуатационных режимов работы вентильного синхронного генератора (ВГ), когда последовательность образования схем замещения заранее определена из предшествующих результатов натурного эксперимента, либо путем математического моделирования на ЭВМ с помощью универсальных ММ.

### Квазианалитический метод построения упрощенных математических моделей вентильных синхронных машин

Нормальные режимы работы вентильного МЭГ характеризуются определенной повторяемостью схем замещения. Так, для нулевых схем замещения (без уравнительного реактора) нормальным является режим проводимости двух или одного вентилей (режим 2-1), для мостовых схем выпрямления – режим 3-2. Поэтому при нормальной работе ВМ выделим некоторый интервал повторяемости, равный периоду пульсаций напряжения:

$$\lambda_{\Pi} = \frac{T}{N_{\Pi}},$$

где  $N_{\Pi} = K_B m$  – число пульсаций за период переменного тока,

$$K_B = \begin{cases} 2, & \text{для мостовых схем выпрямления,} \\ (m = 2p + 1, p = 1, 2, \dots) & \\ 1, & \text{для нулевых схем выпрямления;} \end{cases},$$

где  $m$  – число фаз ВГ.

В свою очередь период пульсаций  $\lambda_{\Pi}$  может состоять из двух подынтервалов непрерывности: коммутационного и межкоммутационного.

Разделим основной период  $[0, T]$  на  $N_{\Pi}$  интервалов  $(t_{k-1}, t_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, N_{\Pi}$ , т. е.

$$T = \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} T_k,$$

где  $T_k = t_k - t_{k-1} = \frac{T}{N_{\Pi}}$ ,  $t_0 = 0$ ,  $t_{N_{\Pi}} = T$ .

С учетом свойства линейности интеграла формула (1) запишется в виде:

$$B = \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} B_k, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} B_k &= \frac{1}{N_{\Pi} T_k} \cdot \int_0^{T_k} A(\tau - (k-1) \cdot T_k) d\tau = \\ &= \frac{1}{N_{\Pi} T_k} \int_{t_{k-1}}^{t_k} A(\tau - (k-1) \cdot T_k - t_{k-1}) d\tau. \end{aligned}$$

По аналогии с (4) разобьем интервал времени  $[t_{k-1}, t_k]$  на  $n$  подынтервалов. Выражение (3) приводится к рекуррентному соотношению следующего вида:

$$\begin{aligned} V_j &= V_{j-1} + \int_{t_{j-1}}^{t_j} A(\tau) d\tau - B_k (t_j - t_{j-1}), \\ V_0 &= E, V_k = V_{\Pi}, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

или

$$V_j = V_{j-1} + \int_0^{T_j} \{A(\tau + t_{j-1}) d\tau - B_k\} d\tau, \quad (5)$$

где  $T_j = t_j - t_{j-1} = \frac{T_k}{n}$  – шаг дискретности вычислений матрицы преобразования на  $k$ -ом интервале непрерывности.

Пусть исходная периодическая система

$$\frac{di}{dt} = A(t)i + U$$

с помощью подстановки

$$i = V(t)y$$

приводится к виду

$$\frac{dy}{dt} = B y + u, \quad (6)$$



где  $y$  – вектор переменных состояния системы (6);  $U$  – вектор возмущения исходной системы;  $u = V^{-1}(t)U$  – вектор возмущений преобразованной системы (6);  $B = V^{-1}(t) \cdot A(t) \cdot V(t)$  – матрица постоянных коэффициентов.

Тогда из уравнений (4) и (5) следует простой способ описания работы ВГ:

1. Аналитическим путем вычисляем матрицу постоянных коэффициентов  $B_k$  и матрицу преобразования  $V_j$  на  $k$ -ом интервале повторяемости по формулам (4) и (5).

2. По формуле:

$$\frac{dy_j}{dt} = B_k y_j + u_j, u_j = V_j^{-1} U_j$$

при начальных условиях  $y_k(0) = y_{k-1}(t_{k-1})$  с шагом интегрирования  $T_j$  находим вектор преобразованных переменных состояния  $y_k$ .

3. По соотношению  $i_k = V_k y_k$  вычисляем переменные состояния исходной системы дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами [3].

Описанная процедура вычислений соответствует случаю, когда переключение с одного вентиля на другой происходит мгновенно.

Рассмотрим случай простой коммутации, соответствующий нормальному квазиустановившемуся режиму работы ВГ.

Основной период  $[0, T]$  разделим на  $2N_{\Pi}$  чередующихся коммутационных и межкоммутационных подынтервалов непрерывности (рис.), т. е.

$$T = \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} T_k = \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} T_k^{(1)} + \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} T_k^{(2)},$$

где  $T_k^{(1)} = t_k^{(1)} - t_{k-1}^{(1)} = \frac{\gamma_k}{\omega}$  –  $k$ -ый коммутационный подынтервал непрерывности;  $\Delta\alpha_k = \alpha_k - \alpha_{k-1}$  – приращение угла управления вентилями на  $k$ -ом интервале;

$$t_k^{(1)} = \frac{(\alpha_{k-1} + \gamma_k)}{\omega}; t_k^{(2)} = \frac{T}{N_{\Pi}} + \frac{\alpha_k}{\omega}; t_{k-1}^{(1)} = \frac{\alpha_{k-1}}{\omega};$$

$$t_{k-1}^{(2)} = t_k^{(1)}; \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} \Delta\alpha_k = 0; \alpha_{N_{\Pi}} = \alpha_0; T_k = \frac{T}{N_{\Pi}} + \frac{\Delta\alpha_k}{\omega},$$

где  $\omega$  – угловая частота.

С учетом принятого разделения формула (1) принимает вид

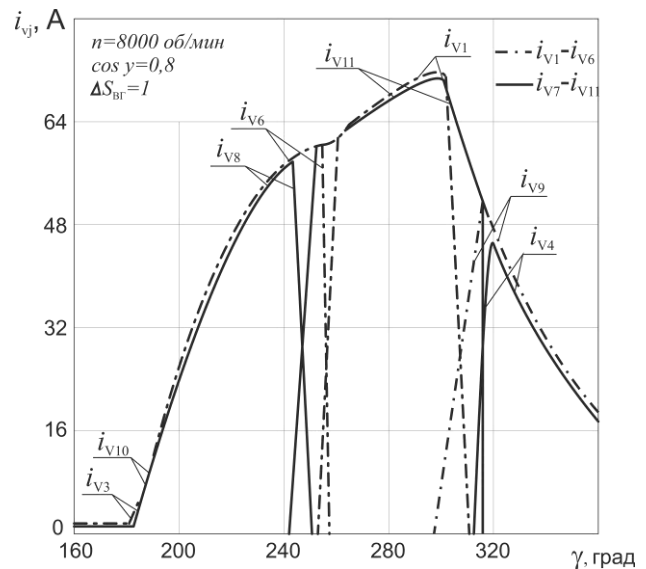
$$B = \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} B_k^{(1)} + \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} B_k^{(2)},$$

где  $B_k^{(1)} = \frac{1}{N_{\Pi} T_k} \int_0^{T_k^{(1)}} A(\tau - (k-1) \cdot T_k) d\tau$  – матрица постоянных коэффициентов в  $k$ -ый подынтервал коммутации;

$$B_k^{(2)} = \frac{1}{N_{\Pi} T_k} \int_0^{T_k^{(2)}} A(\tau - (k-1) \cdot T_k - T_k^{(1)}) d\tau$$

– матрица постоянных коэффициентов в  $k$ -ый межкоммутационный подынтервал.

При дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки вентили проводят группами по 4 ( $\gamma_k = 60^\circ$ ). Данный режим проводимости вентилей сохраняется до возникновения аварийных режимов.



Напряжение на выходе выпрямителя и ток вентилей, поясняющие процессы коммутации  
Rectifier output voltage and valve current explaining switching processes

Матрица преобразований (3) для чередующихся подынтервалов может быть представлена в виде

$$V_k = V_k^{(1)} + V_k^{(2)},$$

где

$$V_k^{(1)} = V_{k-1}^{(2)} + \int_0^{t_k^{(1)} - t_{k-1}^{*(2)}} A(\tau + t_{k-1}^{*(2)}) \cdot d\tau - B_k^{(1)} \cdot (t_k^{*(1)} - t_{k-1}^{*(2)});$$

$$V_k^{(2)} = \int_0^{t_k^{*(2)}} A(\tau + t_k^{*(1)}) \cdot d\tau - B_k^{(2)} \cdot t_k^{*(2)};$$

$t_k^{*(1)} \in [t_{k-1}^{*(2)}, T_k^{(1)}]$ ;  $t_k^{*(2)} \in [T_k^{(1)}, T_k^{(2)}]$ ;  $t_k^* = t_k^{*(1)} + t_k^{*(2)}$ ;  $t_k^{*(1)}$  – верхний переменный предел интегрирования для  $k$ -го коммутационного подынтервала непрерывности;  $t_k^{*(2)}$  – верхний переменный предел интегрирования для  $k$ -го межкоммутационного подынтервала непрерывности.

Из уравнений (7), (8) вытекает следующий способ описания работы ВГ в случае простой коммутации:

1. Определяем аналитическим путем матрицу постоянных коэффициентов и матрицу преобразования в коммутационный подынтервал  $[0, T_k^{(1)}]$  по формулам:

$$B_k^{(1)} = \frac{1}{N_{II} \cdot T_k} \int_0^{T_k^{(1)}} A(\tau - (k-1) \cdot T_k) \cdot d\tau,$$

$$V_k^{(1)} = V_{k-1}^{(2)} + \int_0^{t_k^{*(1)} - t_{k-1}^{*(2)}} A(\tau + t_{k-1}^{*(2)} - B_k^{(1)}) d\tau,$$

$$t_k^{*(1)} \in [t_{k-1}^{*(2)}, T_k^{(1)}]$$

Формулу, определяющую решение дифференциальных уравнений (6) с постоянными коэффициентами в форме Коши, представим в виде:

$$y_k(t_k^{*(1)}) = \exp[B_k^{(1)}(t_k^{*(1)} - t_{k-1}^{*(2)})] \cdot y_{k-1}(t_{k-1}^{*(2)}) + \int_{t_{k-1}^{*(2)}}^{t_k^{*(1)}} \exp[B_k^{(1)}(t_k^{*(1)} - \tau)] \cdot u(\tau) d\tau$$

и найдем ее аналитическое решение на интервале времени  $[t_{k-1}^{*(2)}, T_k^{(1)}]$

2. Аналогичным образом осуществляется процесс вычислений для  $k$ -го межкоммутационного интервала  $[T_k^{(1)}, T_k^{(2)}]$ :

$$V_k^{(2)} = \frac{1}{N_{II} T_k} \int_0^{T_k^{(2)}} A(\tau - (k-1)T_k - T_k^{(1)}) \cdot d\tau,$$

$$V_k^{(2)} = \int_0^{t_k^{*(2)}} \{A(\tau + t_k^{*(1)}) - B_k^{(2)}\} d\tau,$$

$$y_k(t_k^{*(2)}) = \exp[B_k^{(2)}(t_k^{*(2)} - T_k^{(1)})] \cdot y_k(T_k^{(1)}) + \int_{T_k^{(1)}}^{t_k^{*(2)}} \exp[B_k^{(2)}(t_k^{*(2)} - \tau)] \cdot u(\tau) d\tau.$$

3. Последнее матричное уравнение при  $t_k^{*(2)} = T_k^{(2)}$  позволяет путем моделирования на ЭВМ системы трансцендентных уравнений определить угол коммутации  $\gamma_k$  на  $k$ -ом интервале непрерывности схем замещения ВГ.

После выяснения связи между значениями переменных в начале и в конце интервала повторяемости формируется краевая задача, которая решается на ЭВМ обычными итерационными методами.

Таким образом, процедура определения вектора состояния исходной периодической системы уравнений ВГ позволяет составить квазианалитический алгоритм решения системы дифференциальных уравнений с переменной структурой во всем временном интервале, так как схемы замещения через период работы в нормальном эксплуатационном режиме повторяются.

Вектор состояния исходной системы уравнений ВГ определяется по формулам:

$$i_k^{(1)} = V_k^{(1)} y_k^{(1)}; i_k^{(2)} = V_k^{(2)} y_k^{(2)}.$$

Вектор мгновенных значений выпрямленного напряжения при активно-индуктивной нагрузке генератора равен

$$u_{dH}^{(1)} = R_H i_k^{(1)} + L_H \frac{di_k^{(1)}}{dt}; u_{dH}^{(2)} = R_H i_k^{(2)} + L_H \frac{di_k^{(2)}}{dt}.$$

Следовательно, в предложенном квазианалитическом методе построения упрощенных ММ при учете простой коммутации вентилей исходная нелинейная система уравнений ВМ на интервалах повторяемости схем замещения рассматривается как совокупность линейных периодических систем уравнений с неизвестными заранее граничными условиями. Применение метода приведения [3] позволяет преобразовать системы уравнений с периодическими коэффициентами к системам уравнений с постоянной матрицей коэффициентов при любом режиме работы ВГ. Цель такого преобразования заключается в том, что дифференциальные уравнения с постоянной матрицей коэффициентов при векторе состояния поддаются аналитическому решению и позволяют сформулировать краевую задачу для определения неизвестных граничных условий. Из трансцендентных уравнений, полученных в результате аналитического решения преобразованной системы уравнений ВГ, с использованием ЭВМ опреде-

ляются углы коммутации вентиля в заданном временном интервале.

Достоинством предлагаемого квазианалитического метода является то, что полученные выражения (4), (5) или (7), (8), в отличие от метода Еругина – Бреуса [2], в котором аналитические выражения для матриц  $V(t)$  и  $B$  зависят от сходимости степенных рядов относительно величины  $1/\omega$ , справедливы при любых значениях угловых скоростей  $\omega$ , не равных нулю.

Очевидным недостатком метода становится сильно возрастающая сложность и объем вычислений для отличных от нормальных эксплуатационных режимов работы ВГ. Поэтому при анализе, например, аварийных режимов более предпочтительным является использование универсальных ММ [4, 5].

Применение квазианалитического метода к решению задачи математического моделирования для случая мгновенной коммутации вентиля покажем на примере трехфазного МЭГ.

Пример. Уравнения МЭГ, работающего на нулевую схему выпрямления, имеют вид [4]:

$$(L + KL_H K^T) \frac{di_V}{dt} = - \left( R + KR_H K^T + \frac{dL}{dt} \right) i_V + e_M - u_V,$$

где  $R$ ,  $L$  – матрицы параметров фаз генератора;  $R_H$ ,  $L_H$  – параметры нагрузки;  $i_V$ ,  $u_V$  – векторы токов и напряжений вентиля;  $K = [11\dots 1]^T$  – фундаментальная матрица контуров;  $e_M$  – вектор гармонических ЭДС источника (постоянно-го магнита).

При представлении вентиля идеальным ключом:

– для вентиля, проводящего ток,  $u_V = 0$ , а ток через него определяется токами и напряжениями во всех других элементах схемы;

– для вентиля, не проводящего ток,  $i_V = 0$ , а напряжение на нем определяется напряжениями и токами во всех других элементах схемы ВГ, т. е.

$$R_V(i_V) = \begin{cases} 0, & \text{при } i_V > 0 \\ \infty, & \text{при } i_V \leq 0 \end{cases}.$$

Для  $m = 3$   $T_K = \frac{2\pi}{3}$ . Тогда при мгновенной коммутации вентиля достаточно выделить три интервала постоянства схем замещения ВГ.

$$\text{Для интервала } 0 \leq \beta \leq \frac{2\pi}{3}$$

$$\frac{di_1}{d\beta} = A_1(\beta)i_1 + U_1(\beta),$$

где

$$A_1(\beta) = - \frac{R_{\phi_1} + R_H + \frac{dL_1}{d\beta}}{L_1}; \quad U_1(\beta) = \frac{E_m \sin \beta}{L_1};$$

$L_1 = l_0^1 + l_2 \cos 2\beta$ ;  $l_0^1 = l_0 + L_H$ ;  $\beta = \beta_0 + \omega\tau_1$ ;  
 $\tau_1$  – текущее время.

$$\text{Для интервала } \frac{2\pi}{3} < \beta \leq \frac{4\pi}{3} \quad \frac{di_2}{d\beta} = A_2(\beta)i_2 + U_2(\beta),$$

где

$$A_2(\beta) = - \frac{R_{\phi_2} + R_H + \frac{dL_2}{d\beta}}{L_2}; \quad U_2(\beta) = \frac{E_m \sin\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right)}{L_2};$$

$$L_2 = l_0^1 + l_2 \cos\left(2\beta - \frac{2\pi}{3}\right);$$

для интервала  $\frac{4\pi}{3} < \beta \leq 2\pi$   $\frac{di_3}{d\beta} = A_3(\beta)i_3 + U_3(\beta)$ ,

где

$$A_3(\beta) = - \frac{R_{\phi_3} + R_H + \frac{dL_3}{d\beta}}{L_3}; \quad U_3(\beta) = \frac{E_m \sin\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right)}{L_3};$$

$$L_3 = l_0^1 + l_2 \cos\left(2\beta + \frac{2\pi}{3}\right).$$

Здесь  $A_k(\beta)$  – матрица (в данном случае скаляр), составленная из ненулевых элементов исходной матрицы периодических коэффициентов  $A(\beta) = -(L + KL_H K^T)^{-1} \cdot \left( R + KR_H K^T + \frac{dL}{d\beta} \right)$  на  $k$ -ом интервале постоянства схем замещения.

Вырождающиеся в скаляры матрица постоянных коэффициентов и матрицы преобразования, вычисленные аналитически по формулам (4) и (5) для различных интервалов повторяемости, имеют вид:

$$B_1 = \frac{1}{T} \int_0^{T_k} A(\omega\tau) d(\omega\tau) = - \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left| 1 - \frac{l_2}{2l_0^1} \right| + \frac{R_{\phi_1} + R_H}{\sqrt{(l_0^1)^2 - l_2^2}} \cdot \arctg \left( \sqrt{\frac{3(l_0^1 - l_2)}{l_0^1 + l_2}} \right) \right\};$$

$$B_2 = \frac{1}{T} \int_0^{T_k} A\left(\omega\tau - \frac{2\pi}{3}\right) d(\omega\tau) = - \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left| \frac{l_0^1 + l_2}{l_0^1 - 0,5l_2} \right| - \frac{R_{\phi_2} + R_H}{\sqrt{(l_0^1)^2 - l_2^2}} \arctg \left( - \sqrt{\frac{3(l_0^1 - l_2)}{l_0^1 + l_2}} \right) \right\};$$

$$B_3 = \frac{1}{T} \int_0^{T_k} A \left( \omega \tau - \frac{4\pi}{3} \right) d(\omega \tau) = 0.$$

На интервале повторяемости  $0 \leq \beta \leq \frac{2\pi}{3}$

$$V_j = V_{j-1} - \ln \left| \frac{l_0^1 + l_2 \cos(\omega(2T_j + t_{j-1}))}{l_0^1 + l_2 \cdot \cos \omega t_{j-1}} \right| - \frac{R_{\phi 1} + R_H}{\sqrt{(l_0^1)^2 - l_2^2}} \times$$

$$\times \left\{ \arctg \left( \sqrt{\frac{l_0^1 - l_2}{l_0^1 + l_2}} \operatorname{tg} \left( \omega \left( T_j + \frac{t_{j-1}}{2} \right) \right) \right) - \right.$$

$$\left. - \arctg \left( \sqrt{\frac{l_0^1 - l_2}{l_0^1 + l_2}} \operatorname{tg} \frac{\omega t_{j-1}}{2} \right) \right\} - B_j T_j.$$

На интервале  $\frac{2\pi}{3} < \beta \leq \frac{4\pi}{3}$

$$V_j = V_{j-1} - \ln \left| \frac{l_0^1 + l_2 \cos \left( 2\omega T_j - \frac{2\pi}{3} + \omega t_{j-1} \right)}{l_0^1 + l_2 \cdot \cos \left( \omega t_{j-1} - \frac{2\pi}{3} \right)} \right| - \frac{R_{\phi 2} + R_H}{\sqrt{(l_0^1)^2 - l_2^2}} \times$$

$$\times \left\{ \arctg \left( \sqrt{\frac{l_0^1 - l_2}{l_0^1 + l_2}} \operatorname{tg} \left( \omega T_j - \frac{2\pi}{3} + \frac{\omega t_{j-1}}{2} \right) \right) - \right.$$

$$\left. - \arctg \left( \sqrt{\frac{l_0^1 - l_2}{l_0^1 + l_2}} \operatorname{tg} \left( \frac{\omega t_{j-1}}{2} + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right\}.$$

Здесь, как и в (5),  $T_j$  – шаг численного интегрирования,  $j=1, 2, \dots, n$ ;  $V_k = V_n$ .

Таким образом, порядок расчета трехфазного вентильного МЭГ при мгновенной коммутации сводится к следующему:

1. Вычисляются матрицы  $B_k, V_k, k = 1, 2, 3$ .

2. Решается на ЭВМ при  $k = 1$  дифференциальное уравнение  $\frac{dy_1}{dt} = B_1 y_1 + V_1^{-1} U_1(t)$  с шагом численного интегрирования  $T_j$ ; при начальных условиях  $y_1(0) = y_0$ .

3. Находится значение тока исходного уравнения:

$$i_1 = V_{11} y_1.$$

4. Определяется напряжение на  $R$ - $L$  нагрузке

$$u_{H_1} = L_H \frac{di_1}{dt} + R_H i_1.$$

5. Пункты 2–4 повторяются для  $k = 2, 3$  при начальных условиях

$$y_2(0) = y_1 \left( \frac{2\pi}{3} \right); \quad y_3(0) = y_2 \left( \frac{4\pi}{3} \right).$$

Через период процедура вычислений повторяется.

Длина шага интегрирования  $T_j$  внутри интервала непрерывности может быть выбрана достаточно большой. Если длина шага совпадает с интервалом неизменного состава открытых вентилей ( $j = k$ ), то рекуррентное соотношение (5) становится разностным уравнением, которое, как и в случае простой коммутации вентилей, решается аналитически.

### Заключение

На основе модифицированного метода приведения систем с периодическими коэффициентами к системам с постоянными коэффициентами предложен численно-аналитический метод построения упрощенных ММ многофазных ВМ. Численно-аналитические расчеты, проводимые с помощью данного метода, учитывают нестационарные свойства периодических систем уравнений ВМ и справедливы при анализе электромеханических процессов в широком диапазоне изменения частот вращения ротора. Предлагаемый метод рекомендуется применять, например, при анализе и синтезе регуляторов напряжения, а также для сравнения полученных результатов с результатами численных экспериментов на основе моделирующих программ более высокого уровня.

Ряд близких и смежных вопросов моделирования объектов такой физической природы рассмотрен в работах [6–18].

### Список литературы

1. Трещев И.И. Методы исследования машин переменного тока. Л. : Энергия, 1969. 235 с.
2. Лупкин В.М. Теория несимметричных переходных процессов синхронной машины. Л. : Наука, 1985. 147 с.
3. 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.
4. 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.
5. Дедовский А.Н. Электрические машины с высококоэффициентными постоянными магнитами. М. : Энергоатомиздат, 1985. 168 с.
6. Брон Л.П. Методы анализа на ЦВМ вентильных систем как схем с переменной структурой // Преобразовательная техника. 1977. С. 153–150.

7. Семейкин В.Д. Методы анализа динамики электромагнитных процессов в вентильных преобразователях. М. : Информэлектро, 1979. 61 с.
8. Podiyar K.R., Kalra P.K. Analysis of HVDC Converter with Jinite Smoothing Reactor/ Part I-II // *Electric Power Systems Research*. N 11/ 1986/ P. 171-193.
9. 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.
10. Дижур Д.П. Цифровое моделирование электропередач постоянного тока // Передача энергии постоянным током. М. : Энергоатомиздат, 1985. С. 51–63.
11. Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноуцкий И.Г. Численные методы решения жестких систем. М. : Наука, 1979. 208 с.
12. Демирчян К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. М. : Высш. шк., 1988. 335 с.
13. Конеv Ф.Б., Ярлыкова Н.Е. Методы численного решения систем дифференциальных уравнений, применяемые в цифровых моделях вентильных преобразователей. М. : Информэлектро, 1978. 50 с.
14. Лукин В.Н., Романов М.Ф., Толкачев Э.А. Системный анализ электрических цепей и машин. Л. : Изд-во ЛГУ, 1985. 136 с.
15. Беляев П.В. Некоторые свойства математических моделей динамики статических преобразователей энергии // Динамика электрических машин. Омск : ОПИ, 1984. С. 68–74.
16. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин. М. : Высш. шк., 1980. 175 с.
17. Особенности электромагнитного расчета генераторов с редкоземельными постоянными магнитами / И.И. Алексеев, Б.С. Зайчихин, М.Г. Клейман и др. // *Электричество*. 1985. № 11. С.27–30.
18. Арешян Г.Л. Вопросы преобразования дифференциальных уравнений многофазных электрических машин // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1982. № 5. С. 52–62.

### References

1. Treshchev I.I. Metody issledovaniya mashin peremennogo toka [Methods for the research of alternating current machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1969. 235 p.
2. Lupkin V.M. Teoriya nesimmetrichnykh perekhodnykh protessov sinkhronnoi mashiny [Theory of asymmetric transient processes of a synchronous machine]. Leningrad: Nauka Publ., 1985. 147 p.
3. Daneev A.V., Daneev R.A., Szykh 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 – 115.
4. Aleksandrov A.A., Daneev R.A., Szykh 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.
5. Dedovskii A.N. Elektricheskie mashiny s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami [Electrical machines with high-coercivity permanent magnets]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1985. 168 p.
6. Bron L.P. Metody analiza na TSVM ventil'nykh system kak skhem s peremennoi strukturoi [Methods of analysis on a digital computer of valve systems as circuits with a variable structure]. *Preobrazovatel'naya tekhnika* [Converter technology], 1977, pp. 153–150.
7. Semeikin V.D. Metody analiza dinamiki elektromagnitnykh protessov v ventik'nykh preobrazovatelyakh [Methods for analyzing the dynamics of electromagnetic processes in valve converters]. Moscow: Informelektro Publ., 1979. 61 p.
8. Podiyar K.R., Kalra P.K. Analysis of HVDC Converter with Jinite Smoothing Reactor. Part I-II. *Electric Power Systems Research*, 1986, no. 11, pp. 171-193.
9. Daneev A.V., Szykh V.N. Algoritmicheskoe obespechenie konstruirovaniya optimal'nykh regulyatorov po neklassicheskim funktsionalam kachestva v vyrozhdennoi formulirovke [Algorithmic Support for the Design of Optimal Controllers from Nonclassical Performance Functionals in a Degenerate Formulation]. *Materialy 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.
10. Dizhur D.P. Tsifrovoye modelirovanie 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.
11. 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.
12. Demirchyan K.S., Butyrin P.A. Modelirovanie i mashinnyi raschet elektricheskikh tsepei [Modeling and machine calculation of electrical circuits]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1988. 335 p.
13. Konev F.B., Yarlykova N.E. Metody chislennogo 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.
14. Lukin V.N., Romanov M.F., Tolkahev E.A. Sistemnyi analiz elektricheskikh tsepei i mashin [System analysis of electrical circuits and machines]. Leningrad: LGU Publ., 1985. 136 p.

15. 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 Publ., 1984, pp. 68-74.

16. Sipailov G.A., Loos A.V. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1980, 175 p.

17. Alekseev I.I., Zaichikhin B.S., Kleiman M.G., Starovoitova N.P. Osobennosti elektromagnitnogo rascheta generatorov s redkozemel'nymi postoyannymi magnitami [Features of the electromagnetic calculation of generators with rare earth permanent magnets]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1985, no. 11, pp.27–30.

18. Areshyan G.L. Voprosy preobrazovaniya differentsial'nykh uravnenii mnogofaznykh elektricheskikh mashin [Problems of transformation of differential equations of multiphase electrical machines]. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport* [Bulletin of Academy of Sciences of USSR. Energy and transport], 1982, no. 5, pp. 52–62.

#### Информация об авторах

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

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

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

**Хоменко Андрей Павлович**, доктор технических наук, профессор, президент, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: homenko\_ap@irgups.ru

#### Information about the authors

**Alexei V. Daneev**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of Department of the 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 the 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 the Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: sizykh\_vn@mail.ru

**Andrei P. Khomenko**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, President, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: homenko\_ap@irgups.ru

## Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой при попутном и встречном фрезеровании

А.В. Лукьянов<sup>1</sup>✉, Д.П. Алейников<sup>2</sup>, П.Н. Костин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Восточно-Сибирский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>3</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉loukian@inbox.ru

### Резюме

В статье представлены результаты изучения колебаний сил взаимодействия между инструментом и заготовкой при попутном и встречном фрезеровании с целью определения оптимальных режимов резания и их влияния на шероховатость обработанных поверхностей. Авторами проведены экспериментальные исследования процессов фрезерования на обрабатывающем центре HSC 75 DMG и DMC-635 в различных режимах обработки при попутном и встречном фрезеровании с одновременной регистрацией трехмерных вибраций силы резания в точке контакта концевой фрезы с деталью. Для регистрации пространственных составляющих сил резания при фрезеровании использовался установленный на обрабатывающем центре динамометрический стол фирмы «Kistler». Анализ данных с применением специализированного программного обеспечения, методов виброизмерения и вибродиагностики показал, что при значительных угловых скоростях вращения шпинделя в некоторых режимах обработки фреза взаимодействует с заготовкой существенно неравномерно, что ухудшает качество фрезерования и приводит к преждевременному износу инструмента. При изменении угловой скорости вращения шпинделя возникают резонансы в шпинделе, инструменте, в системе крепления и в самой заготовке, что приводит к значительной флуктуации сил фрезерования. В спектре вибрации сил фрезерования возникают многочисленные гармонические составляющие, что связано с нарушением взаимного контакта режущих кромок инструмента с заготовкой. Построение графиков орбит колебаний, проекции сил резания на оси координат, вычисление тангенциальных и радиальных силовых воздействий подтверждают результаты исследования и способствуют определению дополнительных критериев оценки физико-технических процессов резания. Подобные критерии могут использоваться в системах мониторинга и виброзащиты станочного оборудования для обеспечения адаптивного контроля и автоматической коррекции режимов резания.

### Ключевые слова

вибрация при фрезеровании, вибродиагностика механообрабатывающего оборудования, адаптивный контроль резания, мониторинг вибрации, коррекция режимов резания

### Для цитирования

Лукьянов А.В. Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой при попутном и встречном фрезеровании / А.В. Лукьянов, Д.П. Алейников, П.Н. Костин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3(75). – С. 38–49. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).38-49.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 16.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 22.09.2022 г.; принята к публикации: 23.09.2022 г.

## Investigation of oscillations in the forces of interaction of the milling cutter with the workpiece during passing and counter milling

A.V. Luk'yanov<sup>1</sup>✉, D.P. Aleinikov<sup>2</sup>, P.N. Kostin<sup>3</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 the Russian Federation, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>3</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉loukian@inbox.ru

### Abstract

The article presents the results of a study of fluctuations in the forces of interaction between the tool and the workpiece during climb and counter milling in order to determine the optimal cutting conditions and their effect on the quality of machined surfaces. On the basis of a number of experiments on the processing of the workpiece on a modern machining center HSC 75 DMG and DMC-635 in various cutting modes with climb and counter milling, the characteristics of spatial fluctuations in the interaction force of the end mill with the workpiece were obtained. To register the spatial components of the cutting forces during milling, a Kistler torque table installed on the machining center was used. Data analysis using specialized software and vibration theory methods showed that at high spindle speeds in a number of processing modes, the cutting edges of the cutter interact with the workpiece unevenly, which reduces the quality of milling and leads to premature tool wear. When changing the angular frequen-

cy of rotation of the spindle, resonances arise in the spindle, in the tool, in the fastening system and in the workpiece itself, which leads to a significant fluctuation of the milling forces. Numerous harmonic components appear in the vibration spectrum of milling forces, which is associated with a violation of the mutual contact of the cutting edges of the tool with the workpiece. Plotting oscillation orbits, projections of cutting forces on the coordinate axes, calculation of tangential and radial force effects confirm the results of the study and contribute to the determination of additional criteria for assessing physical and technical cutting processes. Similar criteria can be used in monitoring and vibration protection systems for machine tools to provide adaptive control and automatic correction of cutting conditions.

### Keywords

vibration during milling, vibration diagnostics of machining equipment, adaptive cutting control, vibration monitoring, cutting mode correction

### For citation

Luk'yanov A.V, Aleinikov D.P., Kostin P.N. Issledovanie kolebaniy sil vzaimodeystviya frezy s zagotovkoi pri poputnom i vstrechnom frezerovanii [Investigation of oscillations in the forces of interaction of the milling cutter with the workpiece during passing and counter milling]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 38–49. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).38-49.

### Article info

Received: September 16, 2022; Revised: September 22, 2022; Accepted: September 23, 2022.

### Введение

От взаимного направления скоростей вращения фрезы и подачи заготовки (линейного перемещения фрезы) различают два вида фрезерования: попутное и встречное. Попутным называют вариант резания, при котором линейная скорость подачи заготовки совпадает с направлением окружной скорости вращения фрезы (рис. 1).

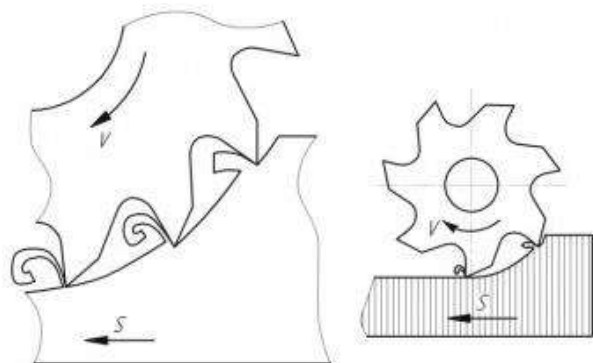


Рис. 1. Схема попутного фрезерования

Fig. 1. Downhill milling scheme

При попутном резании зубья фрезы в начальный момент контакта с заготовкой нагружаются резко (скачкообразно), при этом происходит ударное воздействие с поверхностью заготовки, что неизбежно приводит к снижению ресурса инструмента [1–5]. При этом толщина стружки максимальна в начале фрезерования и плавно снижается до нуля на выходе из зоны резания. Это позволяет избежать «затирания» рабочих кромок фрезы и упрочнения поверхностного слоя в начальные моменты снятия

металла [6]. Максимальная толщина стружки на входе дает определенные преимущества, так как происходит прижатие фрезы к заготовке под действием сил резания, что обеспечивает постоянный контакт с материалом. Прижатие фрезы к заготовке приводит к непреднамеренному увеличению параметра подачи на зуб, что, в свою очередь, вызывает увеличение снимаемой толщины стружки и, как следствие, преждевременному износу режущих кромок [7–12]. Для снижения данных негативных последствий рекомендуется применять встречное фрезерование.

Зубья фрезы в начальный момент взаимодействия с заготовкой прижимают ее к опорной поверхности, в связи с чем увеличивается жесткость сопряжения и повышается точность обработки.

На рис. 2 показана схема встречного фрезерования, когда направление окружной скорости фрезы и подачи противоположны.

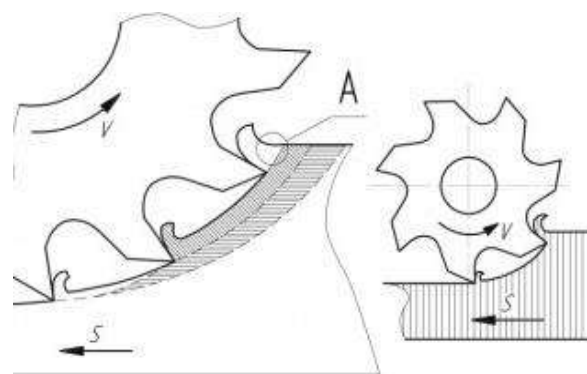


Рис. 2. Схема встречного фрезерования

Fig. 2. Uphill milling scheme



В случае неподвижной заготовки ее линейная скорость эквивалентна линейной скорости фрезы. При встречном фрезеровании толщина стружки изменяется от нуля в начале взаимодействия фрезы с заготовкой и до максимума в конце.

Режущая кромка зуба фрезы в момент начала взаимодействия начинает скользить по поверхности заготовки до момента пока трение достигнет критической величины и начнется врезание зуба в заготовку. Трение и «выглаживание» поверхности заготовки может привести к упрочнению ее поверхностного слоя, к отжиму фрезы, повышению температуры и упрочнению поверхностного слоя заготовки [13, 14]. Большая температура и значительные растягивающие напряжения негативно влияют на стойкость инструмента, вызывают налипание или наваривание стружки на режущие кромки фрез, что приводит к их частой поломке. Деформации в обрабатываемой системе, сопровождающиеся возникновением вибраций, приводят к снижению качества обрабатываемой поверхности [15–20].

Радиальные силы фрезерования стремятся оторвать заготовку от стола. Встречное фре-

зерование эффективно при больших значениях припуска на обработку, при обработке жаропрочных сплавов с помощью керамических пластин, так как керамика чувствительна к нагрузкам, возникающим при врезании [4].

Попутное фрезерование применяется при фрезеровании на жестком оборудовании; чистовой обработке; снятии относительно небольшого слоя за проход; обработке слабо уплотненных материалов на поверхности.

Встречное фрезерование рационально при предварительной обработке материалов и обработке поверхностно плотных материалов.

Целью исследования является изучение колебаний сил взаимодействия между инструментом и заготовкой при попутном и встречном фрезеровании для определения оптимальных режимов резания и их влияния на качество обработанных поверхностей. Для достижения поставленной цели осуществлялось исследование сил резания на обрабатывающем центре HSC 75 DMG и DMC-635 при взаимодействии режущей части инструмента с заготовкой, установленной на динамометрическом столе «Kistler» (рис. 3). Полученные данные трех



Рис.3. Динамометрический стол фирмы «Kistler» на обрабатывающем центре DMC-635

Fig. 3. Kistler torque table on DMC-635 machining center torque table

компонентов сил резания анализировались в программе «DynaWare» фирмы «Kistler».

#### Материалы и методы исследования

Механообработка выполнялась фрезой диаметром  $d = 25$  мм; число режущих кромок  $z = 2$ ; режимы резания назначались в соответствии с рекомендациями производителя инструмента

для попутного и встречного фрезерования; глубина резания  $a_p = 1$  и 2 мм, ширина резания  $a_e = 5$  мм; подача на зуб  $f_z = 0,2$  мм; скорость резания  $V_c = 235,5$  м/мин, угловая скорость вращения фрезы  $n = 3\,000$  об/мин; оборотная частота  $f_o = 50$  Гц; зубцовая частота  $f_s = 100$  Гц; период оборотной частоты  $T_o = 20$  мс; период зубцовой частоты  $T_s = 10$  мс.

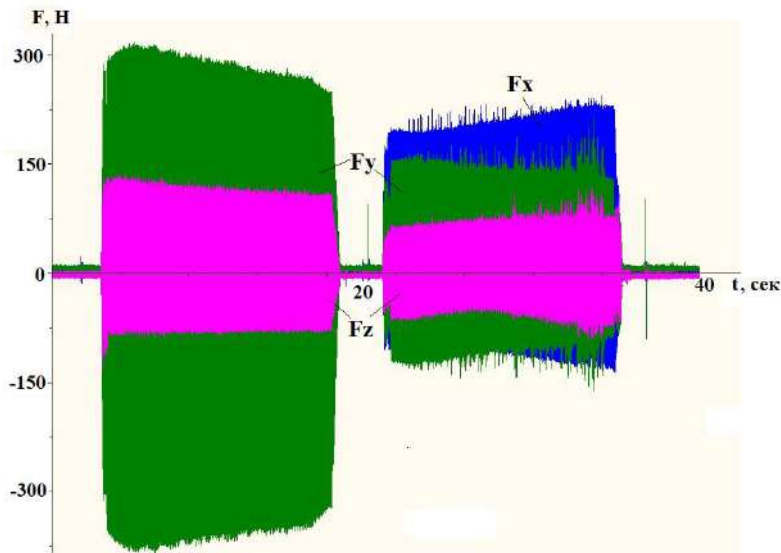


Рис. 4. Колебания проекций силы фрезерования при глубине резания 1 мм: попутное (0–20 с) и встречное (20–40 с) фрезерование

Fig. 4. Fluctuations in the projections of the milling force at a depth of cut of 1 mm: downhill (0–20 s) and uphill (20–40 s) milling

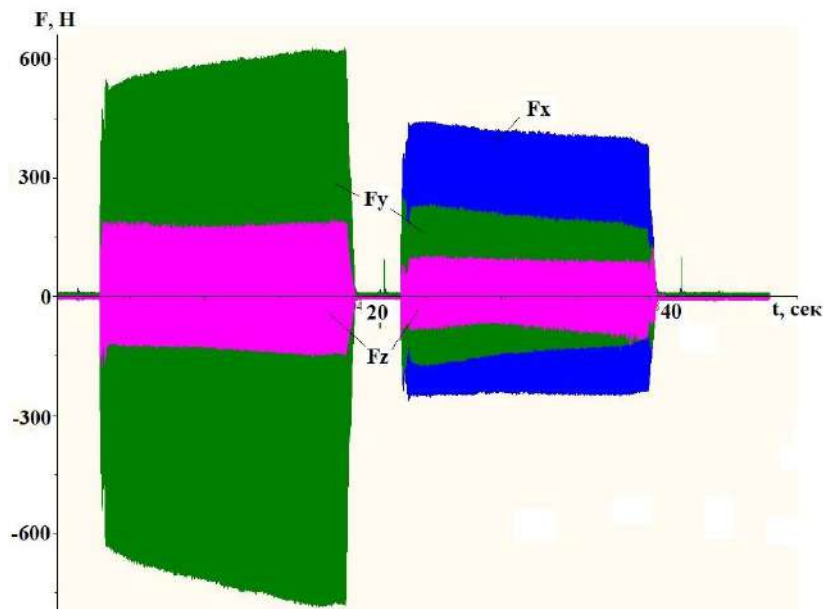


Рис. 5. Колебания проекций силы фрезерования при глубине резания 2 мм: попутное (0–20 с) и встречное (20–40 с) фрезерование

Fig. 5. Fluctuations in the projections of the milling force at a depth of cut of 2 mm: downhill (0–20 s) and uphill (20–40 s) milling

Осциллограммы проекций сил резания  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  (вдоль, поперек и перпендикулярно плоскости фрезерования) с глубиной резания 1 и 2 мм при попутном и встречном направлении фрезерования представлены на рис. 4 и 5. Графики указывают, что амплитуда на некоторых частотах сил резания при попутном фрезеровании значительно выше, чем при встречном фрезеровании.

Основной спектральной составляющей вибрационного процесса фрезерования должна быть зубцовая частота. При геометрическом неравенстве режущих кромок и при резонансах станка должна проявляться гармоника оборотной частоты. Нелинейный характер вибрации при ударно-периодическом взаимодействии режущих кромок фрезы с заготовкой проявляется в наличии нескольких гармоник зубцовой

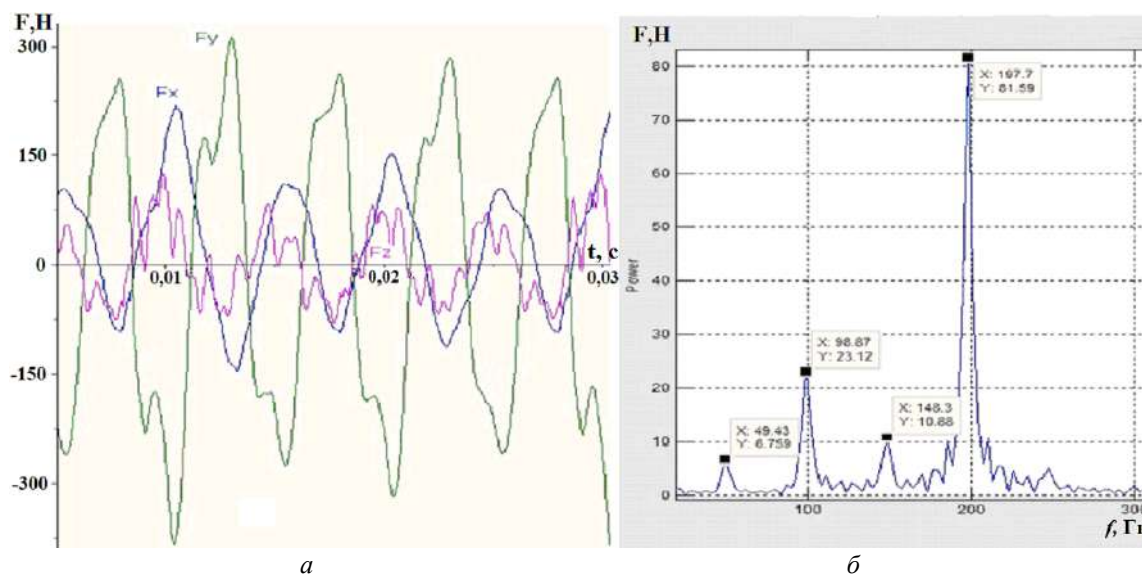


Рис. 6. Фрагмент осциллограммы колебаний составляющих силы фрезерования (а) и спектр силы по оси X (б) при попутном фрезеровании (глубина резания 1 мм)

Fig. 6. A fragment of the oscillogram of fluctuations in the components of the milling force (a) and the force spectrum along the X axis (b) during climb milling (cutting depth 1 mm)

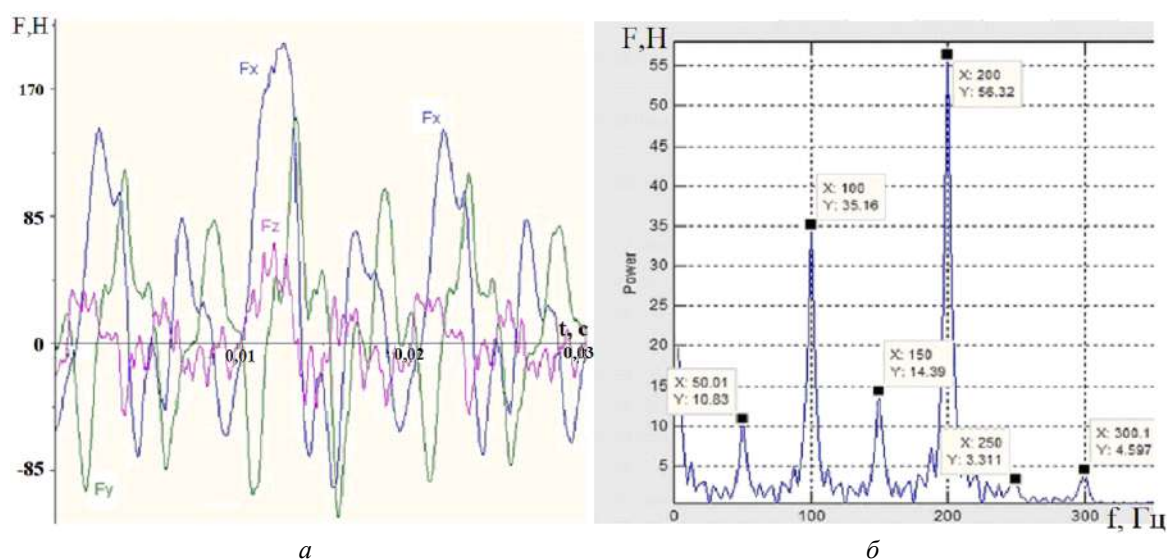


Рис. 7. Фрагмент осциллограммы колебаний по трем координатам силы фрезерования (а) и спектр силы по оси X (б) при встречном фрезеровании (глубина резания 1 мм)

Fig. 7. A fragment of the oscillogram of fluctuations in the components of the milling force (a) and the spectrum of the force along the X axis (b) during uphill milling (cutting depth 1 mm)

частоты. На практике наиболее значительной является вторая гармоника, превышающая на некоторых режимах обработки в 2–10 раз амплитуду зубцовой гармоники, что свидетельствует о существенно нелинейном характере силового взаимодействия фрезы и заготовки. При попутном фрезеровании сечение стружки в момент входа резца в металл будет больше, чем при его выходе, а направление движения режущей кромки будет близко к направлению подачи. На рис. 6 представлены осциллограммы колебаний составляющих силы фрезерования по трем координатам и спектр силы при попутном фрезеровании.

При встречном фрезеровании в момент начала прохода сечение стружки будет существенно меньшим, чем при его выходе. Окружная скорость режущей кромки  $V$  в процессе резания осуществляется всегда навстречу движению подачи  $S$ . На рис. 7 представлены осциллограммы трехмерных колебаний и спектр силы фрезерования при встречной обработке. Значения проекций среднеквадратических значений

(СКЗ) сил резания и соответствующие им спектральные составляющие в направлениях  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  представлены в табл.

Сравнительный анализ СКЗ сил резания при попутном и встречном фрезеровании показал, что поперечная и вертикальная составляющие силы резания  $F_y$  и  $F_z$  увеличились при попутном фрезеровании в 2,5–3,8 раз (глубины обработки 1 и 2 мм), а продольная составляющая  $F_x$  уменьшилась на 20 % в сравнении со встречным фрезерованием.

Сравнительный анализ спектральных составляющих вибрации сил резания при попутном и встречном фрезеровании показывает следующее:

1. На глубинах обработки 1 и 2 мм по координате  $X$  амплитуды почти всех гармоник при попутном фрезеровании уменьшаются на 10–45 % по сравнению со встречным фрезерованием, кроме гармоники 200 Гц (глубина 1 мм), на которой при попутном фрезеровании происходит увеличение на 45 %.

2. На тех же глубинах обработки 1 и 2 мм

Анализ среднеквадратичных значений проекций сил резания и спектральных составляющих этих сил по трем направлениям  
Analysis of square deviation projections of cutting forces and spectral components of these forces in three directions

Вид резания	Проекция среднеквадратичного значения силы фрезерования, Н			Спектральные составляющие по оси X, Н				
	$F_x$	$F_y$	$F_z$	50 Гц	100 Гц	150 Гц	200 Гц	
Глубина фрезерования 1 мм								
Попутное	60,6	129,2	28,7	6,7	23	10,9	81,6	
Встречное	48,6	35,4	11,7	10,8	35,2	14,4	56,3	
<u>Попутное</u> Встречное	1,2	3,6	2,5	0,6	0,7	0,8	1,5	
Глубина фрезерования 2 мм								
Попутное	84,6	199	42,1	14,1	42,6	23,6	116,2	
Встречное	110,5	52,4	16,2	24,5	76,3	36,8	129,0	
<u>Попутное</u> Встречное	0,8	3,8	2,6	0,6	0,6	0,6	0,9	
Спектральные составляющие по оси Y, Н				Спектральные составляющие по оси Z, Н				
Вид резания	50 Гц	100 Гц	150 Гц	200 Гц	50 Гц	100 Гц	150 Гц	200 Гц
Глубина фрезерования 1 мм								
Попутное	6,5	17,8	4,2	181,7	3,7	6,9	3,4	39,7
Встречное	1,5	7,1	3,5	49,4	4,3	8,7	3,8	13
<u>Попутное</u> Встречное	4,3	2,5	1,2	3,7	0,9	0,8	0,9	3,1
Глубина фрезерования 2 мм								
Попутное	16,3	38	13,6	278,3	4,0	8,7	4,5	58,6
Встречное	5,1	15,4	7,5	72,1	3,6	8,9	3,8	20,4
<u>Попутное</u> Встречное	3,2	2,5	1,8	3,9	1,1	1,0	1,2	2,9

по координате  $Y$  при попутном фрезеровании увеличение вибрации в 1,2–4,3 раза по сравнению со встречным фрезерованием.

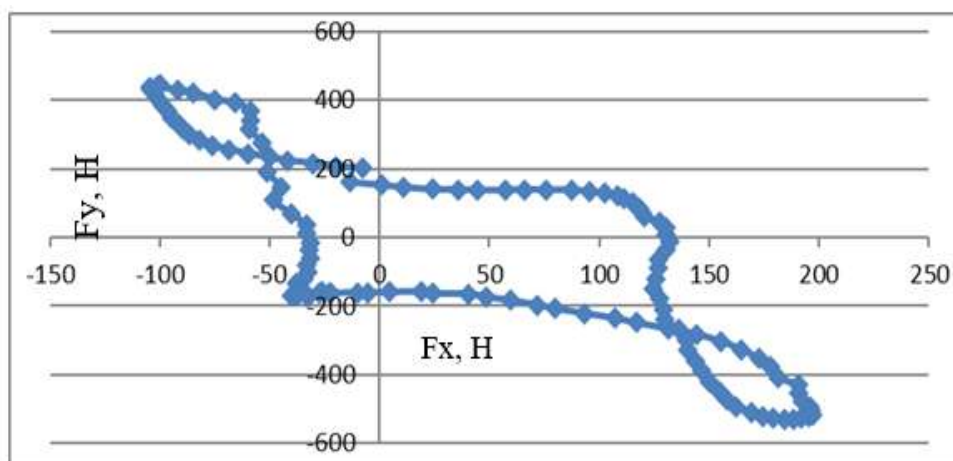
3. По координате  $Z$  при попутном фрезеровании вибрация остается почти на том же уровне на частотах 50–150 Гц и увеличивается в 3 раза на частоте 200 Гц по сравнению со встречным фрезерованием.

В результате анализа СКЗ осциллограмм колебаний и спектров сил по трем направлениям при попутном и встречном фрезеровании можно констатировать, что попутное фрезерование при глубинах обработки 1 и 2 мм создает в поперечном и вертикальном направлениях в 2,5–3,8 раз большие вибрационные нагрузки, чем встречное фрезерование (за исключением оси  $X$  вдоль направления обработки, когда виб-

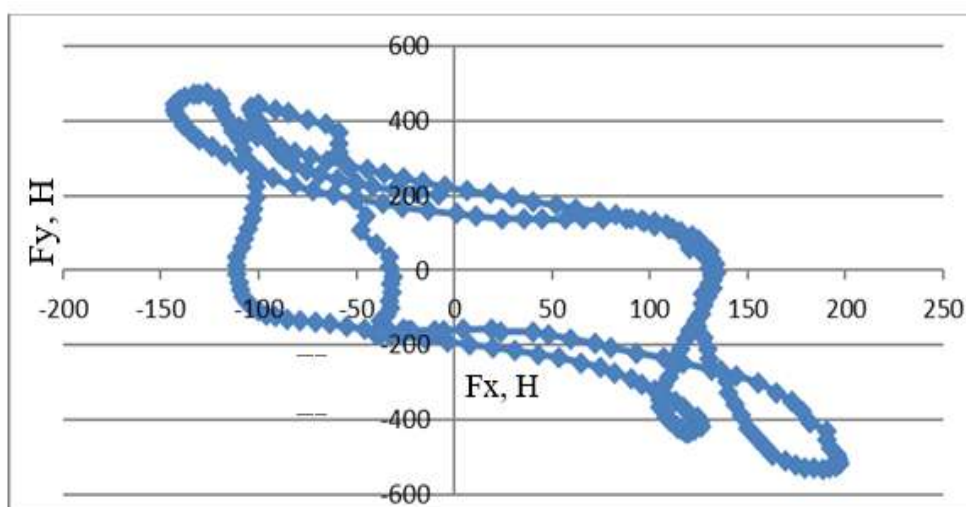
рация сил резания уменьшается на 10–30 %).

По проекциям силы резания на оси  $X$  и  $Y$  попутного фрезерования (см. рис. 6, а) была построена орбита за период зубцовой частоты (рис. 8). Орбита на данном рисунке замкнута, что свидетельствует об отсутствии кратковременного разрыва контактирующих поверхностей фрезы с заготовкой. Деформация формы орбиты обусловлена различной амплитудой колебаний по координатам и наличием второй гармоники зубцовой частоты.

На рис. 9 приведена орбита силы попутного фрезерования за период оборотной частоты. Орбита образуется суммой двух орбит зубцовой частоты. Орбита замкнута, однако орбиты зубцовой частоты несколько смещены относительно друг друга и не являются полной ко-



**Рис. 8.** Орбита сил резания за период зубцовой частоты 1,57 мс  
**Fig. 8.** Orbit of cutting forces for the period of tooth frequency 1,57 ms



**Рис. 9.** Орбита сил резания за период оборотной частоты 3,14 мс  
**Fig. 9.** Orbit of cutting forces per revolution frequency period 3,14 ms

пией одна другой, что свидетельствует о некоторых различиях в работе каждой из двух режущих кромок фрезы.

При попутном фрезеровании орбиты сил за период зубцовой и оборотных частот замкнуты, что свидетельствует о стабильной работе всех режущих кромок на участках снятия стружки.

Из приведенных на рис. 8 и 9 орбит сил резания можно сделать вывод, что режущие кромки фрезы работают в несколько различных условиях, что объясняется различием геометрических и функциональных параметров каждой из двух режущих кромок, а это влияет на качество механообработки (в основном на шероховатость поверхности). Несовпадающие характеристики работы двух кромок подтверждаются наличием пика оборотной частоты в спектрах вибросигнала. Вклад гармоник оборотной частоты по отношению к вкладу гармоник зубцовой частоты (см. табл.) составляет в среднем 25–30 %, что также свидетельствует о различиях в работе каждой из двух режущих кромок фрезы. Причиной этого может быть и резонанс оборотной частоты вращения шпинделя с соответствующими частотами некоторых узлов станка, в частности с частотами возможных совместных колебаний инструмента и заготовки.

Для сравнения проведено измерение вибрации сил при фрезеровании на более низкой скорости вращения  $n = 1\,800$  об/мин концевой

фрезы с числом режущих кромок  $z = 4$ . На рис. 10, а приведен спектр колебаний силы фрезерования в направлении обработки  $F_x$  с одиночным пиком на зубцовой частоте 120 Гц. На рис. 10, б представлена орбита колебаний проекций сил фрезерования в координатах  $F_x, F_y$  в плоскости обработки за период оборотной частоты с четырьмя завершенными эллиптическими орбитами зубцовых частот. При отсутствии резонансов механообработка каждой из четырех режущих кромок ведется более равномерно.

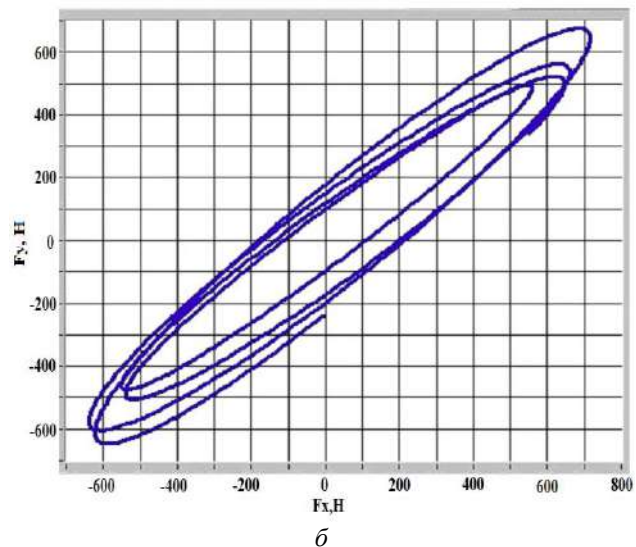
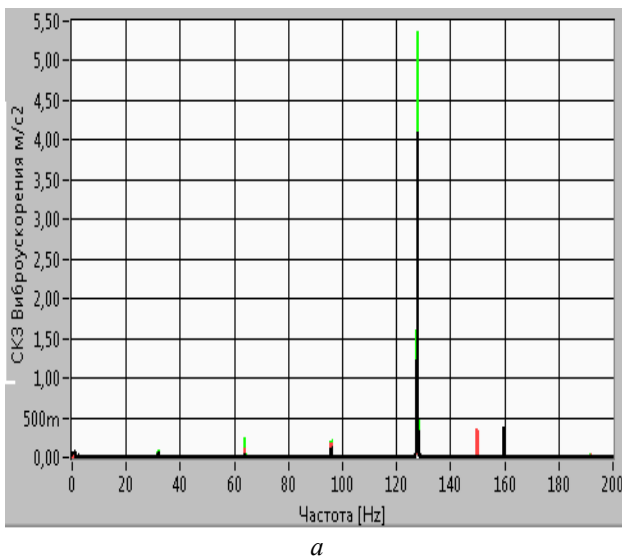
Новую информацию при исследовании вибрации сил взаимодействия фрез с заготовкой представляют проекции сил в цилиндрической системе координат. Определение тангенциальных  $F_\tau$  и радиальных  $F_r$  составляющих силы фрезерования по проекциям сил  $F_x$  и  $F_y$  (рис. 11) проводилось по уравнениям:

$$F_\tau = F \cos \varphi; F_r = F \sin \varphi; F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2};$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - (\gamma + \alpha);$$

$$\alpha = \omega t \quad \gamma = \arctg\left(\frac{F_y}{F_x}\right).$$

Изменение тангенциальной и радиальной сил при обработке за период оборотной частоты при попутном фрезеровании представлено на рис. 12 и 13.



**Рис. 10.** Спектр колебаний силы фрезерования в направлении обработки  $F_x$  (а) и орбита колебаний сил фрезерования концевой фрезой с четырьмя режущими кромками (б)

**Fig. 10.** Milling force fluctuation spectrum in machining direction  $F_x$  (a) and milling force fluctuation orbit with a 4-flute end mill (b)

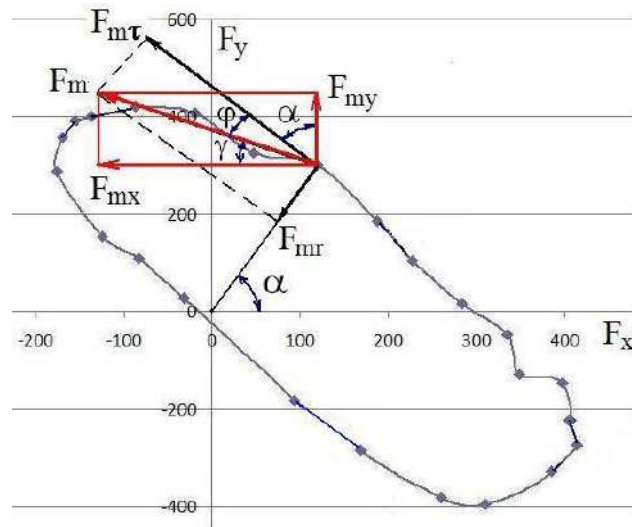


Рис. 11. Проекция силы резания на декартовы и естественные оси координат  
 Fig. 11. Cutting Force Projections on Cartesian and Natural Coordinate Axes

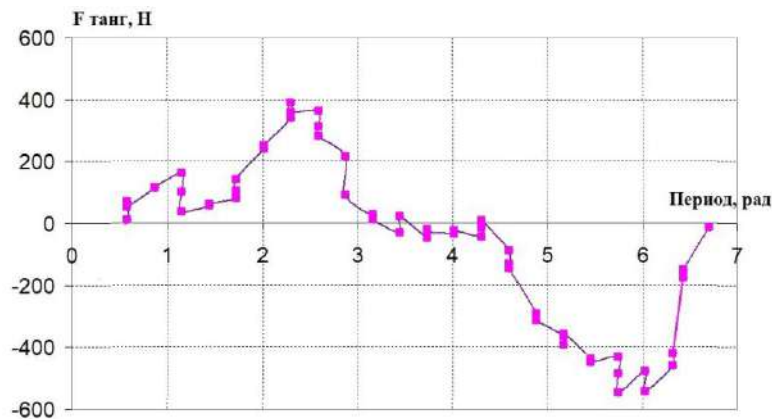


Рис. 12. Изменение тангенциальной силы резания за период оборотной частоты при встречном фрезеровании  
 Fig. 12. Change in the tangential milling force over the period of revolution frequency in up-cut milling

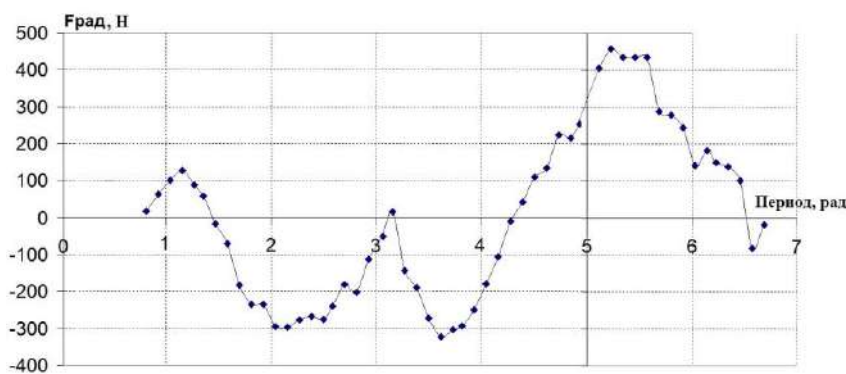


Рис. 13. Изменение тангенциальной силы резания за период оборотной частоты при попутном фрезеровании  
 Fig. 13. Change in the tangential milling force over the period of revolution frequency during climb milling

Проведенный анализ тангенциальных и радиальных вибрационных сил при попутном фрезеровании показывает снижение амплитуд этих колебаний по сравнению со встречным

фрезерованием. Графики тангенциальных и радиальных сил за период оборотной частоты, изображенные на рис. 12 и 13 близки к периоду синусоидальной силы с учетом искажений за

счет присутствия значительной по амплитуде второй гармоники зубцовой частоты, что и подтверждается приведенными данными по спектральному составу вибрации сил по координатам  $X$ ,  $Y$  при фрезеровании.

### Заключение

Полученные данные в виде осциллограмм и спектров сил резания в декартовых и цилиндрических координатах позволили исследовать силовые взаимодействия инструмента с заготовкой при попутном и встречном фрезеровании. Данные настоящего исследования показывают, что предпочтительное использование попутного фрезерования в то же время приводит к значительному возрастанию поперечной вибрации на оборотной, зубцовой и второй гармониках зубцовой частоты, т. е. на высокочастотных вибрациях, что может привести к резонансу системы «инструмент – приспособление – заготовка». Исследование графиков радиальных и тангенциальных колебаний сил фрезерования иллюстрирует «неидеальный» случай обработки заготовки, когда режущие кромки фрезы загружены неравномерно и работают не на всем участке снятия стружки. Исследования траекторий орбит сил обработки на зубцовых и оборотных частотах дают новую информацию о неравномерной загрузке режущих

кромки фрез, что неизбежно негативно сказывается на качестве фрезерования и ускоренном износе инструмента.

На основе проведенных экспериментальных исследований силовых взаимодействий при фрезеровании были сформулированы следующие выводы:

1. Уровень колебаний составляющих сил резания по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  изменяется от 4 до 10 раз в зависимости от режимов фрезерования.

2. На многих режимах режущие кромки фрезы работают с неполной нагрузкой (в 25 % случаях работала только одна режущая кромка фрезы из двух). Это увеличивает шероховатость поверхности детали и способствует преждевременному износу инструмента.

3. Вибрационным признаком оптимального фрезерования является наличие значительной гармоники зубцовой частоты при минимуме остальных гармоник. При этом орбита сил резания за период будет иметь равенство между количеством замкнутых траекторий и числом режущих кромок. Данный признак может использоваться в системах мониторинга и виброзащиты станочного оборудования для обеспечения адаптивного контроля и автоматической коррекции режимов резания.

### Список литературы

1. Исследование влияния режимов резания на выходные параметры при точении фрезерованием быстрорежущей стали / Г.В. Матлыгин, А.В. Савилов, А.С. Пятых и др. // *Advanced Engineering Research*. 2022. Т. 22. № 2. С. 99–106.
2. Вопросы конечно-элементного анализа винтов транспедикулярной фиксации / А.С. Пятых, А.А. Дук, С.А. Тимофеев и др. // *Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) : материалы докладов VI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием*. Иркутск, 2022. С. 244–251.
3. Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Портной А.Ю. Система защиты обрабатываемых центров от опасных динамических нагрузок на основе анализа параметров вибрации и силы // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. 2017. Т. 21. № 4 (123). С. 30–38.
4. Пятых А.С., Савилов А.В., Николаев А.Ю. Исследование зажимных патронов для сверления точных отверстий // *Системы. Методы. Технологии*. 2016. № 4 (32). С. 70–74.
5. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Исследование динамики крепления датчиков вибрации шпинделей обрабатываемых центров // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. 2015. № 2 (97). С. 28–35.
6. Serebrennikova A.G., Savilov A.V. A Study of Effects of the Cutting Tool Geometry on the Output Parameters When Turning VT22 Titanium Alloy // *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. Челябинск, 2022. С. 642–649. DOI 10.1007/978-3-030-85230-6\_76.
7. Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование пространственной вибрации обрабатываемого центра в режиме фрезерования // *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 1 (21). С. 96–101.
8. Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Костин П.Н. Разработка и опытная эксплуатация системы виброударозащиты и диагностики обрабатываемых центров // *Проблемы механики современных машин : сб. ст. VIII Междунар. конф.* Улан-Удэ, 2022. С. 150–155.
9. Пятых А.С., Савилов А.В., Тимофеев С.А. Метод контроля износа режущего инструмента при концевом фрезеровании нержавеющей стали // *Трение и износ*. 2021. Т. 42, № 4. С. 411–417.
10. Timofeev S., Savilov A., Pyatykh A. Studies on the effect of cutter wear on cutting dynamics when turning // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. Part 4. P. 1367–1370. DOI 10.1016/j.matpr.2020.08.105.
11. Savilov A., Pyatykh A., Nikitenko A. Axial contact points method for improving end-milling productivity // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. Part 4. P. 1505–1507. DOI 10.1016/j.matpr.2020.08.138.



12. Nikitenko A. V., Savilov A. V., Pyatykh A. S. Study of the axial contact points method applied when end-milling titanium alloys // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. P. 436-444. DOI 10.1007/978-3-030-54817-9\_51.
13. Pyatykh A.S., Savilov A.V. A study of vibration measuring devices used in the edge cutting machining // *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. Челябинск, 2022. С. 634–641. DOI 10.1007/978-3-030-85230-6\_75.
14. Исследование технологии обработки отверстий малых диаметров в полимерном композиционном материале на робототехническом комплексе / Н.С. Чашин, Ю.Н. Иванов, А.В. Сидорова и др. // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. 2017. Т. 21. № 6 (125). С. 39–48.
15. Чашин Н.С., Иванов Ю.Н. Обработка отверстий в смешанных пакетах методом орбитального сверления // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. 2015. № 11 (106). С. 44–49.
16. Неразрушающий контроль / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 8. М : Машиностроение, 2005. 789 с.
17. Григорьев С.Н., Гурин В.Д., Козочкин М.П. Диагностика автоматизированного производства. М : Машиностроение, 2011. 600 с.
18. Семенов Е.Н., Беломестных А.С., Сидорова А.В. Исследование частотных характеристик работа KUKA KR210 R2700 extra // *Авиационное машиностроение и транспорт Сибири : сб. ст. всерос. молодежн. науч.-практ. конф. Иркутск, 2016*. С. 252–257.
19. Савилов А.В., Пятых А.С. Влияние вибраций на точность и качество поверхности отверстий при сверлении // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. 2013. № 12 (83). С. 103–111.
20. Савилов А.В., Пятых А.С. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки // *Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук*. Т. 17. № 2. 2015. С. 211–216.

### References

1. Matlygin G.V., Savilov A.V., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. Issledovanie vliyaniya rezhimov rezaniya na vykhodnye parametry pri tochenii frezerovaniem bystrorezhushchei stali [Research of the effect of cutting modes on output parameters under high-speed steel turn-milling]. *Advanced Engineering Research*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 99–106.
2. Pyatykh A.S., Duk A.A., Timofeev S.A., Ushakov V.A. Voprosy konechno-elementnogo analiza vintov transpedikul'ynoi fiksatsii [Questions of finite element analysis of transpedicular fixation screws]. *Materialy dokladov VI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Zhiznennyi tsikl konstruktivnykh materialov (ot polucheniya do utilizatsii)»* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation «The life cycle of constructional materials (from receipt to disposal)»]. Irkutsk, 2022, pp. 244–251.
3. Luk'yanov A.V., Aleinikov D.P., Portnoi A.Yu. Sistema zashchity obrabatyvayushchikh tsentrov ot opasnykh dinamicheskikh nagruzok na osnove analiza parametrov vibratsii i sily [The system of protection of machining centers from dangerous dynamic loads based on the analysis of vibration and force parameters]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 4 (123), pp. 30–38.
4. Pyatykh A.S., Savilov A.V., Nikolaev A.Yu. Issledovanie zazhimnykh patronov dlya sverleniya tochnykh otverstii [Investigation of chucks for drilling precise holes]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2016, no. 4 (32), pp. 70–74.
5. Aleinikov D.P., Luk'yanov A.V. Issledovanie dinamiki krepleniya datchikov vibratsii shpindelei obrabatyvayushchikh tsentrov [Research of fixation dynamics of machining center spindle vibration sensors]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 2(97), pp. 28–35.
6. Serebrennikova A.G., Savilov A.V. A Study of Effects of the Cutting Tool Geometry on the Output Parameters When Turning VT22 Titanium Alloy. *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. *ICIE: International Conference on Industrial Engineering*, 2022, pp. 642-649. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6\\_76](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_76).
7. Luk'yanov A.V., Aleinikov D.P. Issledovanie prostranstvennoi vibratsii obrabatyvayushchego tsentra v rezhime frezerovaniya [Research of vibration machining center in milling mode]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014, no. 1 (21), pp. 96–101.
8. Lukyanov A.V., Aleinikov D.P., Kostin P.N. Razrabotka i opytная ekspluatatsiya sistemy vibroudaro-zashchity i diagnostiki obrabatyvayushchikh tsentrov [Development and trial operation of the system of vibration-shock protection and diagnostics of machining centers]. *Sbornik statei VIII mezhdunarodnoi konferentsii «Problemy mekhaniki sovremennykh mashin»* [Proceedings of VIII International Conference «Problems of the mechanics of modern machines»]. Ulan-Ude, 2022, pp. 150–155.
9. Pyatykh A.S., Savilov A.V., Timofeev S.A. Metod kontrolya iznosa rezhushchego instrumenta pri kontsevom frezerovanii nerzhavayushchei stali [Method of tool wear control when stainless steel end milling]. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 2021, vol. 42, no. 4, pp. 411–417. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-4-411-417>.
10. Timofeev S., Savilov A., Pyatykh A. Studies on the effect of cutter wear on cutting dynamics when turning. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, part 4, pp. 1367-1370. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.105>.
11. Savilov A., Pyatykh A., Nikitenko A. Axial contact points method for improving end-milling productivity. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, part 4, pp. 1505-1507. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.138>.
12. Nikitenko A. V., Savilov A. V., Pyatykh A. S. Study of the axial contact points method applied when end-milling titanium alloys. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering* / eds. A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov. Cham: Springer, 2020, pp. 436-444. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_51).
13. Pyatykh A.S., Savilov A.V. A study of vibration measuring devices used in the edge cutting machining. *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. *ICIE: International Conference on Industrial Engineering*, 2022, pp. 634-641. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6\\_75](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_75).

14. Chashchin N.S., Ivanov Yu.N., Sidorova A.V., Semenov E.N., Sturov A.A. Issledovanie tekhnologii obrabotki otverstii malykh diametrov v polimernom kompozitsionnom materiale na robototekhnicheskom komplekse [Investigation of the technology of processing holes of small diameters in a poly-dimensional composite material on a robotic complex]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 6 (125), pp. 39–48.
15. Chashchin N.S., Ivanov Yu.N. [Processing of openings in mixed packages by the method of orbital drilling]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2015, no. 11 (106), pp. 44–49.
16. Nerazrushayushchii kontrol' (v 8 t.) [Non-destructive testing (in 8 vol.)]. Vol. 8. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 789 p.
17. Grigor'ev S.N., Gurin V.D., Kozochkin M.P. Diagnostika avtomatizirovannogo proizvodstva [Diagnosis of computer-aided manufacturing]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2011. 600 p.
18. Semenov E.N., Belomestnykh A.S., Sidorova A.V. Issledovanie chastotnykh kharakteristik robota KUKA KR210 R2700 extra [Research of the frequency characteristics of the robot KUKA KR210 R2700 extra]. *Sbornik statei vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aviamashinostroenie i transport Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference «Air-transport engineering of Siberia»]. Irkutsk, 2016, pp. 252–257.
19. Savilov A.V., Pyatykh A.S. Vliyanie vibratsii na tochnost' i kachestvo poverkhnosti otverstii pri sverlenii [Influence of vibration on accuracy and quality of hole surface under drilling]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2013, no. 12(83), pp. 103–111.
20. Savilov A.V., Pyatykh A.S. Opredelenie koeffitsientov sil rezaniya dlya modelirovaniya protsessov mekhanoobrabotki [The identification cutting force coefficients for simulation of the machining]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Bulletins of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, vol. 17, no. 2, pp. 211–216.

### Информация об авторах

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

**Алейников Дмитрий Павлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск; e-mail: dmitriy-aleinikov@mail.ru.

**Костин Павел Николаевич**, аспирант кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: kostin95pavel@mail.ru.

### Information about the authors

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

**Dmitrii P. Aleinikov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Information technology, East Siberian Institute of Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Irkutsk; e-mail: dmitriy-aleinikov@mail.ru.

**Pavel N. Kostin**, Ph.D. student of Department of Technology and equipment of machine-building industries, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: kostin95pavel@mail.ru.

## Моделирование формирования основных показателей качества поверхностного слоя деталей при дробеударном упрочнении

В.П. Кольцов, Ле Чи Винь, Д.А. Стародубцева✉, Нгуен Минь Хоанг

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

✉starodybseva@ex.istu.edu

### Резюме

Одной из эффективных финишных операций является дробеударная обработка, при которой под действием ударов дроби обрабатываемую поверхность детали происходит поверхностное пластическое деформирование, обеспечивающее заданные характеристики материала деталей. В авиастроении панели и обшивки крыла самолета, работающие в условиях циклических нагрузений, для повышения сопротивления их усталости после процесса формообразования и зачистки лепестковым кругом подвергаются дробеударному упрочнению. Контрольными параметрами процесса дробеударного упрочнения являются шероховатость поверхности, микротвердость, величина упрочненного слоя, остаточные напряжения и т.д. Однако, если шероховатость поверхности и микротвердость несложно определяются традиционными методами, то определение величины упрочненного слоя и остаточных напряжений – более трудоемкая задача. В последнее время с развитием информационных технологий все чаще применяются различные программы инженерного анализа для изучения сложных технологических процессов, включая и дробеударную обработку. В представленной работе проведено исследование формирования упрочненного слоя и остаточных напряжений в поверхностном слое, вызванных операцией дробеударного упрочнения детали из алюминиевого сплава с использованием программы инженерного анализа методом конечных элементов. По результатам исследования представлены наглядные данные по напряженно-деформированному состоянию поверхностного слоя после соударения дроби с обрабатываемой поверхностью; приведены графические распределения остаточных напряжений по глубине в поверхностном слое и зависимости значений максимальных остаточных напряжений от диаметра и скорости удара дроби; разработаны рекомендации по выбору условий и режимов при дробеударном упрочнении, а также математические модели для определения величины упрочненного слоя и максимальных остаточных напряжений в поверхностном слое детали.

### Ключевые слова

дробеударное упрочнение, упрочненный слой, остаточные напряжения, моделирование, качество поверхностного слоя

### Для цитирования

Моделирование формирования основных показателей качества поверхностного слоя деталей при дробеударном упрочнении / В.П. Кольцов, Ле Чи Винь, Д.А. Стародубцева, Нгуен Минь Хоанг // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3(75). – С. 50–58. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).50-58.

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 27.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 29.09.2022 г.; принята к публикации: 29.09.2022 г.

## Modelling of the formation of the main quality indicators of the surface layer of parts during shot-impact hardening

V.P. Kol'tsov, Le Chi Vinh, D.A. Starodubtseva✉, Nguyen Minh Hoang

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

✉starodybseva@ex.istu.edu

### Abstract

One of the effective finishing operations is shot-impact blasting in which, under the impact influence of the shot on the surface of the workpiece, surface plastic deformation occurs, providing the specified characteristics of the material of the parts. In the aircraft industry to increase the fatigue resistance of aircraft panels and wing skins operating under cyclic loads, after the process of their shaping and grinding with a flap wheel, such parts are subjected to shot-impact hardening. The control parameters of the shot-impact hardening process are surface roughness, microhardness, the size of the hardened layer, residual stresses, etc. At the same time, while the surface roughness and microhardness are not difficult to determine by traditional methods determining the size of the hardened layer and residual stresses is a more complex and time-consuming task. Recently, with the development of information technology, various engineering analysis programs have been increasingly used to study various complex technological processes, including shot-impact processing. In the present paper, a study of the formation of a hardened layer and residual stresses in the surface layer caused by the operation of shot-impact hardening of an aluminum alloy part using an engineering analysis program by the finite element method is carried out. According to the results of the study, visual pictures of the stress-strain state of the surface layer after the impact of the shot with the treated surface are presented, graphical distributions of residual stresses along the depth in the surface layer and the dependence of the values of maximum residual stresses on the diameter and velocity of the shot impact are presented, recommendations on the choice of conditions

and modes for shot-impact hardening are developed, as well as mathematical models for determining the value of the hardened layer and the maximum residual stresses in the surface layer of the part.

### Keywords

shot-impact hardening, hardened layer, residual stresses, modeling, surface layer quality

### For citation

Koltsov V.P., Le Chi Vinh, Starodubtseva D.A., Nguyen Minh Hoang. Modelirovanie formirovaniya osnovnykh pokazatelei kachestva poverkhnostnogo sloya detalei pri drobepudarnom uprochnenii [Modeling of the formation of the main quality indicators of the surface layer of parts during shot-impact hardening]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 50–58. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).50-58.

### Article info

Received: September 27, 2022; Revised: September 29, 2022; Accepted: September 29, 2022.

### Введение

Одной из эффективных финишных операций является дробеударная обработка, при которой под действием ударов дроби об обрабатываемую поверхность детали происходит поверхностное пластическое деформирование, обеспечивающее заданные характеристики материала деталей. В авиастроении панели и обшивки крыла самолета, работающие в условиях циклических нагрузений, для повышения сопротивления их усталости после процесса формообразования и зачистки лепестковым кругом подвергаются дробеударному упрочнению [1–5].

Оценка величины упрочненного поверхностного слоя и сжимающих остаточных напряжений представляет наиболее трудоемкую и непростую задачу [6–16]. Для получения необходимых значений величин упрочненного слоя и остаточных напряжений детали конкретного материала необходимо назначить рациональные режимы упрочнения. В настоящее время применяются различные методики назначения режимов упрочнения, однако такие методики разработаны на основе результатов дорогостоящих и трудоемких экспериментов [17–22]. При этом зачастую эксперименты все еще проводятся при статических условиях, что не позволяет получить реальную картину процесса упрочнения, которую сложно использовать для прогнозирования результатов обработки в практических целях.

### Постановка задачи

Представленная работа посвящена исследованию формирования величины упрочненного слоя и остаточных напряжений в поверхностном слое при дробеударном упрочнении детали из алюминиевого сплава с помощью программы инженерного анализа методом конечных элементов.

При анализе реального процесса дробеударного упрочнения [2] часть потока дроби, обладающая заданной скоростью, имеет нормальное направление движения к обрабатываемой поверхности, другая часть дроби попадает на поверхность под различными углами. Из-за отклонения части дроби от начального направления, часть кинетической энергии дроби приходится на трение, соударения с отскочившими дробинками, вследствие чего на обработанной поверхности образуются лунки с различными диаметрами и глубиной. Это приводит к неравномерности величины упрочненного слоя и распределения остаточных напряжений. Все перечисленное ухудшает качество обработанной поверхности.

Для исследования формирования величины упрочненного слоя и остаточных напряжений в поверхностном слое под отпечатками дроби в условиях и параметрах режимов дробеударной обработки, близких к реальным, была использована программа Ansys с модулем динамического анализа.

Результаты исследований многих авторов показали, что лучшее качество упрочненного слоя можно получить при обработке дробью со степенью покрытия отпечатками дроби на обработанной поверхности в пределах 90 % (соотношение площади поверхности детали, покрытой отпечатками дроби к общей исследуемой площади). Предварительные исследования показали [23], что для изучения процесса дробеударной обработки необходимо смоделировать единственный удар дроби об обрабатываемую поверхность детали. Повторный удар на сформировавшийся отпечаток дроби или удар последующих дробинок рядом с ранее сформировавшимся отпечатком незначительно влияет на значение величины упрочненного слоя и максимальных

значений остаточных напряжений, полученных от первого удара дроби.

Для моделирования единичного удара дроби приняты исходные данные, близкие к практическим условиям (табл.).

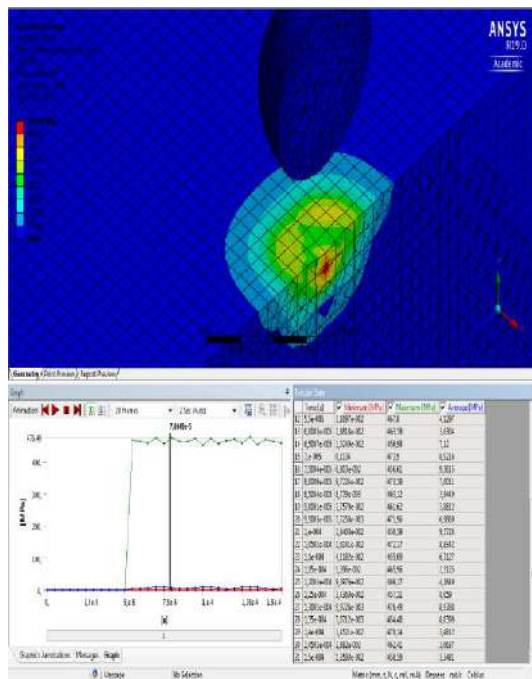
Конечно-элементная модель дробеударного упрочнения в виде модели единичного удара шара о поверхность пластины построена в среде модуля Explicit Dynamics программы инженерного анализа Ansys Workbench 19.0. При этом, такие параметры, как размер шара, начальная скорость полета шара, его материал, размер и материал пластины заданы согласно данным вышеуказанной таблицы. Для случаев удара шара о поверхность пластины под различным углом, в качестве нагрузки на модель шара прило-

жены две составляющие начальной скорости, включающие нормальную (перпендикулярно поверхности пластины со значением  $V\cos\alpha$ ) и касательную (параллельно поверхности модели пластины –  $V\sin\alpha$ ). Нижняя поверхность модели пластины зафиксирована. Генерация сетки конечных элементов модели шара и пластины – автоматическая.

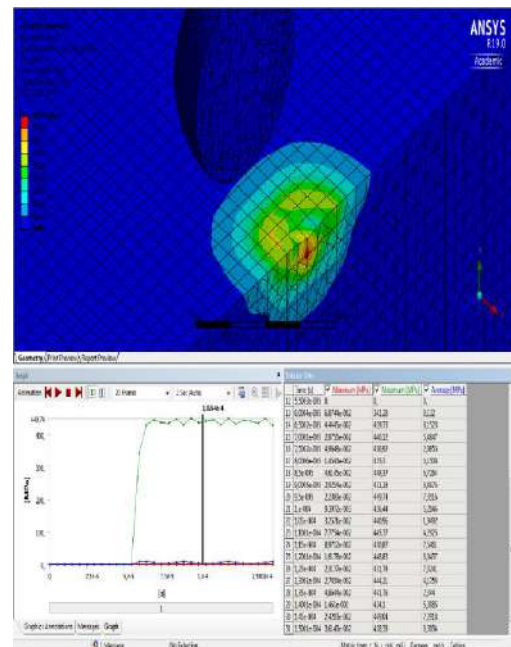
В качестве материала для модели пластины обрабатываемой детали назначен материал BT95, как наиболее широко используемый в авиационной промышленности, в частности для изготовления панелей крыла самолета. Размер модели шара назначен с учетом практического использования дроби на производстве, скорость удара – на

Исходные данные моделирования единичного удара дроби  
Initial data for the simulation of a single shot impact

Показатель / Indicator	Параметры /Parameters
Материал дроби / Shot material	Абсолютный жесткий шарик / Absolute hard ball
Материал обрабатываемой детали / Material of the part	AL7075-T6 (аналог BT95 / analogue to BT95)
Диаметр дроби, мм / Shot diameter, mm	0,6; 1; 1,4; 1,8
Скорость удара дроби, м/с / Impact speed, m/sec	10; 15; 20; 25; 30
Угол соударения с поверхностью, $\alpha$ , град. / Surface impact angle, $\alpha$ , degrees	0; 10; 15; 20; 25; 30
Габаритный размер заготовки, мм / Workpiece overall dimension, mm	5×5×5



а



б

Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя после удара дроби:

а – угол удара дроби о поверхность –  $0^\circ$ ; б – угол удара дроби о поверхность –  $30^\circ$

Fig. 1. The stress-strain state of the surface layer after the impact with the shot:

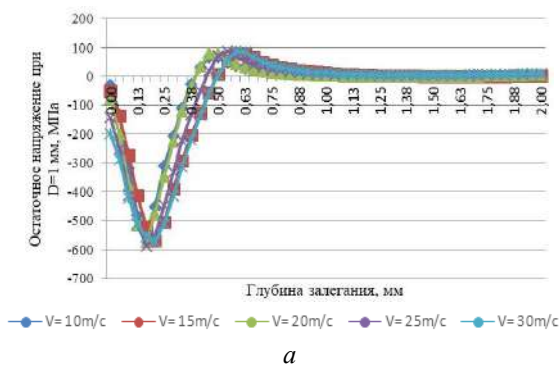
а – the angle of the shot impact on the surface –  $0^\circ$ ; б – the angle of the shot impact on the surface –  $30^\circ$

основании возможной окружной скорости дробеметного колеса дробеударной установки [3]. Размер заготовки подобран в соответствии с результатами предварительного моделирования, проводимого с целью получения достоверных результатов и максимально возможного сокращения времени анализа в программе Ansys [23].

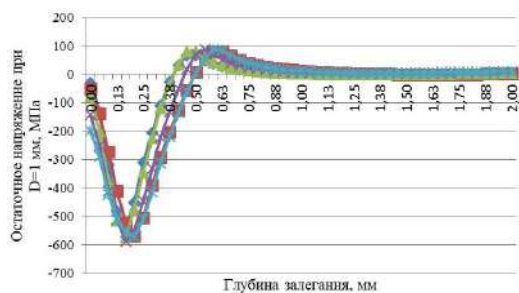
На рис. 1 представлены результаты анализа типичных картин напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя в поперечном сечении. Сечение проходит через центр шара и отпечатка в виде лунки, образованной в результате остаточной деформации на поверхности пластины после удара. Угол соударения шара с поверхностью (угол между вектором скорости и обрабатываемой поверхностью детали) составил 0 и 30°.

Анализ результатов исследования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя показал, что независимо от направления скорости, значений скорости и размера дроби напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя обрабатываемого материала у отпечатка дроби имеет аналогичный характер.

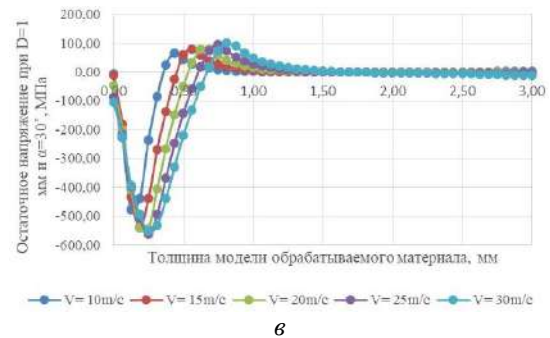
На рис. 2 представлены типовые графики изменения нормальных остаточных напряжений в поверхностном слое под центром отпечатка дроби при ударе дробью диаметром 1 мм под углом 0°, 15° и 30°.



а



б



в

**Рис. 2.** Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое под центром отпечатка дроби при ударе дробью диаметром 1 мм о поверхность под углом:

$a - 0^\circ$ ;  $b - 15^\circ$ ;  $в - 30^\circ$

**Fig. 2.** Distribution of residual stresses in the surface layer under the center of the shot imprint when a fraction with a diameter of 1 mm hits the surface at an angle of:

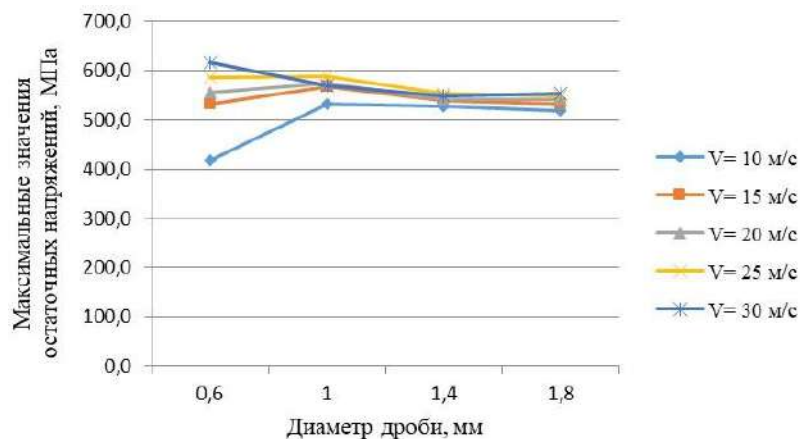
$a - 0^\circ$ ;  $b - 15^\circ$ ;  $c - 30^\circ$

Графики распределения остаточных напряжений в поверхностном слое пластины в результате моделирования удара шара (см. рис. 2,  $a - в$ ) показали высокую сходимость по форме и характеру с экспериментальными данными других исследователей [6–12].

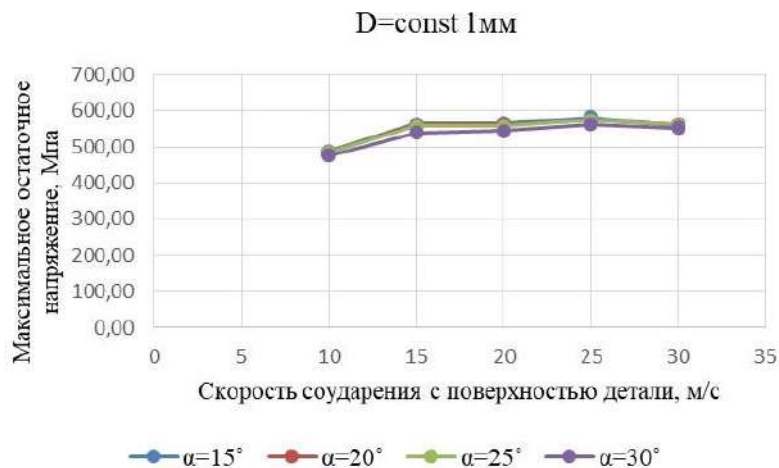
По характеру кривых (см. рис. 2,  $a - в$ ) видно, что независимо от скорости удара и направления удара дроби о поверхность детали распределение остаточных напряжений в поверхностном слое детали имеет аналогичную форму, но с некоторым сдвигом по толщине поверхностного слоя.

На рис. 3 представлены зависимости величин максимальных значений остаточных напряжений при ударе дроби в нормальном направлении к поверхности детали в зависимости от скорости удара и размера дроби. На рис. 4 показаны подробные зависимости величин максимальных значений остаточных напряжений при ударе дроби диаметром 1 мм о поверхность в зависимости от скорости и угла удара.

По характеру представленных на рис. 3 графиков видно, что для дроби (диаметр от 1,2 мм до 1,8 мм) независимо от скорости удара (в пределах от 10 до 30 м/с) при прямом ударе дроби о поверхность детали максимальное значение остаточных напряжений под дном отпечатка дроби меняется незначительно в отличие от дроби меньшего размера. По данным рис. 4 – при скорости удара дроби диаметром 1 мм



**Рис. 3.** Максимальные значения остаточных напряжений под центром отпечатка дроби при ударе дробью о поверхность под углом  $0^\circ$  в зависимости от диаметра дроби и различного значения скорости  
**Fig. 3.** The maximum values of the residual stress under the center of the shot imprint when the fraction hits the surface at an angle of  $0^\circ$ , depending on the diameter of the fraction and the different value of the velocity



**Рис. 4.** Максимальное остаточное напряжение под центром отпечатка дроби в зависимости от угла соударения при различной скорости удара дроби диаметром 1 мм  
**Fig. 4.** The maximum residual stress under the center of the shot imprint, depending

свыше 15 м/с вне зависимости от направления удара (отклонение от нормали к обрабатываемой поверхности до 30 град.) максимальное значение остаточных напряжений в поверхностном слое детали также меняется незначительно.

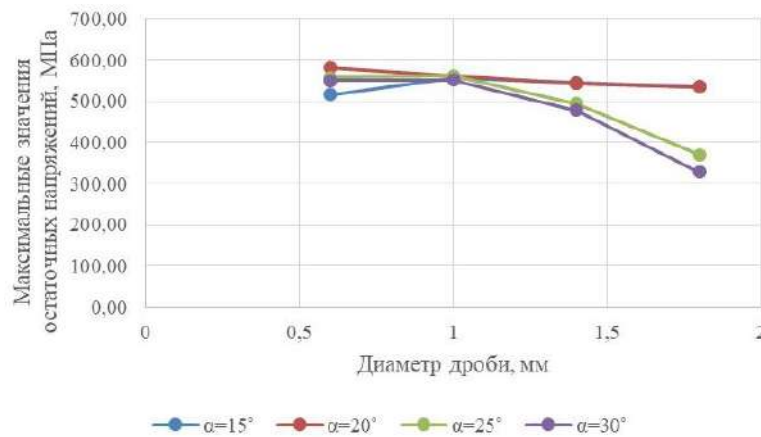
На рис. 5 представлены графики значений максимальных остаточных напряжений при ударе дроби о поверхность со скоростью 30 м/с в зависимости от угла удара и размера дроби.

Моделирование процесса внедрения стальной дроби диаметром 1 мм при скорости от 15 до 30 м/с позволило сделать вывод о том, что значения остаточных напряжений практически не зависят от угла удара дроби. При этом их величина достаточно высока и практически не отличается от значений остаточных напряжений в тех случаях, когда вектор направления

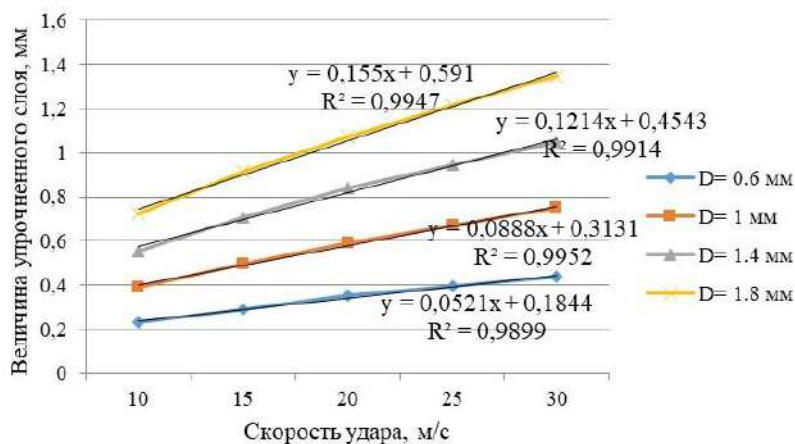
скорости дроби перпендикулярен обрабатываемой поверхности детали. Применение дроби диаметром 1 мм дает наиболее стабильные значения остаточных напряжений в поверхностном слое, что, в свою очередь, повышает качество обработки. При обработке даже при одном постоянном режиме в любом случае присутствует некоторая часть потока дроби, которая ударяет о поверхность детали под разными углами атаки и с разной скоростью.

На рис. 6 представлены графики величины упрочненного слоя детали при ударе дроби по направлению нормали к поверхности в зависимости от скорости удара и размера дроби.

На рис. 7 представлены графики величины упрочненного слоя детали в зависимости от скорости удара и размера дроби при угле



**Рис. 5.** Максимальные значения остаточных напряжений под центром отпечатка дроби при ударе дробью о поверхность со скоростью 30 м/с в зависимости от угла соударения и диаметра дроби  
**Fig. 5.** The maximum values of the residual stress under the center of the shot imprint when the fraction hits the surface at a speed of 30 m/s, depending on the angle of impact and the diameter of the shot



**Рис. 6.** Зависимости изменения величины упрочненного слоя детали дробью от диаметра и скорости дроби при ее ударе о поверхность под углом  $0^\circ$   
**Fig. 6.** Dependences of the change in the size of the shot hardened layer of the part on the diameter and velocity of the shot when the shot hits the surface at an angle of  $0^\circ$

удара дроби  $30^\circ$ .

Анализ величины упрочненного слоя под отпечатком дроби, проведенный в результате моделирования, показал, что для потока дроби, ударяющего о поверхность детали под углом  $\alpha$ , не превышающем  $20^\circ$ , величина упрочненного слоя линейно зависит от размера дроби; при  $\alpha > 20^\circ$  данная величина зависит от размера дроби и описывается экспонентной кривой. При применении дроби малого размера (диаметром от 0,6 до 1 мм) величина упрочненного слоя принимает стабильное значение и практически не зависит от угла удара дроби. Таким образом, применение дроби малого диаметра при упрочнении приводит к получению более равномерного упрочненного слоя детали. Однако абсолютная

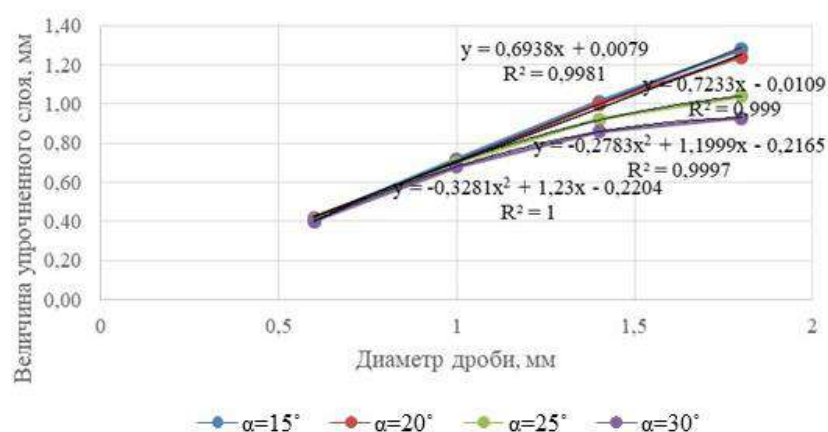
величина упрочненного слоя детали зависит от размера дроби и скорости ее удара, поэтому в зависимости от требований к качеству обработки в каждом конкретном случае необходимо выбрать соответствующие режимы и условия обработки.

### Заключение

Разработанная модель удара дроби о поверхность в среде компьютерного моделирования и инженерного анализа Ansys позволяет раскрыть полную картину напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя под отпечатком дроби и определить величину упрочненного слоя при упрочнении деталей.

Для деталей из алюминиевого сплава ВТ95 при упрочнении дробью диаметром более





**Рис. 7.** Величина упрочненного слоя детали, полученная в зависимости от угла атаки дроби  $\alpha$  и скорости 30 м/с, при различных диаметрах дроби  
**Fig. 7.** The value of the hardened layer of the part obtained depending on the angle of attack of the shot  $\alpha$  and the velocity 30 m/s, for different diameters of the shot

1 мм максимальные значения остаточных напряжений под центром отпечатка дроби изменяются незначительно даже при изменении скорости удара и его направления. Однако величина упрочненного слоя детали прямо пропорциональна диаметру и скорости удара дроби.

Полученные зависимости максимальных значений остаточных напряжений в поверх-

ностном слое под отпечатком дроби и величины упрочненного слоя в зависимости от размера дроби, скорости и направления потока дроби позволяют выбрать рациональные условия и режимы дробеударного упрочнения панелей и обшивок крыла самолета из алюминиевого сплава ВТ95 в зависимости от требований к качеству поверхностного слоя деталей.

### Список литературы

1. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием / И.Р. Асланян, А.С. Бубнов, В.Н. Емельянов и др. Иркутск : ИрГТУ, 2014. 559 с.
2. Пашков А.Е., Шматков В.С. Особенности технологии дробеударного упрочнения крупногабаритных деталей самолетов // Управление технологическими процессами машиностроительного производства : сб. ст. Иркутск, 1998. С. 62–66.
3. Пашков А.Е. Об особенностях применения Отечественной и зарубежной технологии формообразования обшивок и панелей самолетов // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2015. № 5 (100). С. 17–22.
4. Пашков А.Е., Малащенко А.Ю., Пашков А.А. К вопросу создания цифровых технологий производства крупногабаритных деталей каркаса и обшивки самолета // Технология металлов. 2021. № 1. С. 36–46.
5. Гребенников Д.С., Максименков В.И. Формообразование панелей крыла дальнемагистрального самолета // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2019. Т. 15. № 1. С. 116–121.
6. Пашков А.А. Моделирование процесса формообразования крупногабаритных деталей двойной кривизны на дробебетных установках контактного типа // Технология металлов. 2020. № 12. С. 19–28.
7. Пашков А.Е., Дияк А.Ю. Определение параметров дробеударного формообразования-упрочнения при помощи CAD/CAM/CAE систем // Управление технологическими процессами машиностроительного производства : сб. ст. Иркутск : Иркут. гос. техн. ун-т, 1998. С. 62–66.
8. Meguid S.A., G. Shagal, J.C. Stranart, J.Daly. Tree-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses // Finite Elements in Analysis and Design. 1999. P. 13. DOI 10.1016/S0168-874X(98)00057-2.
9. Baragetti S. Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction // International Journal of Computer Applications in Technology. 2001. Vol. 14. Is. 1-3. P. 51–63.
10. Miao H. Y. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening / H. Y. Miao, S. Larose, C. Per-ron et al. // Adv. Eng. Softw. 2009. Vol. 40. P. 1023–1038.
11. Zhuo Chen., Yang Fan, Meguid S. A. Realistic Finite Element Simulations of Arc-Height De-velopment in Shot-Peened Almen Strips // Journal of Engineering Materials and Technology. 2014. Vol. 136. DOI 10.1115/1.4028006.
12. Bhuvaraghan B. Shot peening simulation using discrete and finite element methods / B. Bhuvaraghan, S. M. Srinivasan, O. Prakash et al. // Advances in Engineering Software. 2010. Vol. 41. Is. 12. P. 1266–1276.
13. Касимов Б. М-у., Муминов М.Р., Шин И.Г. Поверхностное упрочнение деталей технологических оборудований и моделирование напряженного состояния при дробеударной обработке // Сб. науч. трудов Междунар. науч. конф., посвящ. 150-летию со дня рождения проф. Н.А. Васильева. Москва, 2021. С. 122–127.
14. Методика расчета технологических параметров превентивного деформирования упрочняемых деталей типа «стенка» / А.А. Макарук, О.В. Самойленко, Ю.Н. Иванов и др. // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2021. Т. 25. № 1(156). С. 8–16.

15. Определение внутренних силовых факторов, возникающих при упрочнении подкрепленных ребрами деталей / А.А. Макарук, А.А. Пашков, А.М. Хамаганов и др. // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2018. Т. 22. № 10 (141). С. 29–37.
16. Makaruk A.A., Pashkov A.A., Samoilenko O.V. Increasing the shape accuracy of the hardened parts of the frame by technological methods // International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019, Irkutsk, 2019. Vol. 632. p. 012100. DOI 10.1088/1757-899X/632/1/012100.
17. Назаров С.Р., Шодмонкулов З.А. Определение глубины деформационного упрочнения на основе энергетических соотношений дробеударной обработки // Материалы докладов 54-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. Витебск, 2021. Т. 2. С. 279–281.
18. Дрозд М.С., Осипенко А.П. Аналитическое исследование напряженного состояния при внедрении упругой сферы в упруго-пластическое полупространство // Металловедение и прочность металлов : сб. науч. тр. Волгоград, 1977. Вып. 8. С. 58–68.
19. Определение рациональных технологических режимов упрочняющей дробеобработки стальных деталей / М.М. Матлин, А.И. Мозгунова, В.О. Мосейко и др. // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. 2014. № 9 (136). С. 99–102.
20. Матлин М.М., Мозгунова А.И., Лебский С.Л. Прогнозирование параметров упрочнения деталей машин путем поверхностного пластического деформирования // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. 2005. № 3. С. 52–55.
21. Лебедеенко В.Г. Математическое моделирование процесса формирования геометрических параметров поверхностного слоя и параметров упрочнения при обработке деталей дробью // Вестник ДГТУ. 2008. Т. 8. № 4 (39). С. 202–212.
22. Кравченко Г.Н., Кравченко К.Г. Выбор технологических параметров дробеударного упрочнения силовых деталей авиационных конструкций // Полет. 2018. № 12. С. 37–44.
23. Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Нгуен Минь Хоанг. Моделирование формирования основных параметров качества поверхностного слоя при дробеударном упрочнении // Авиационное строительство и транспорт Сибири : сб. ст. XIV Междунар. науч.-техн. конф. Иркутск, 2020. С. 104–112.

### References

1. Aslanyan I.R., Bubnov A.S., Emel'yanov V.N., Isaev A.N., Zaides S.A., Kopylov Yu.R., Kropotkina E.Yu., Lebskii S.L., Matlin M.M., Mozgunova A.I., Popov M.E., Shuster L.Sh. Obrabotka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Processing of parts by surface plastic deformation]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2014. 559 p.
2. Pashkov A.E., Shmatkov V.S. Osobennosti tekhnologii drobeudarnogo uprochneniya krupnogabaritnykh detalei samoletov [Features of the technology of shot-impact hardening of large-sized aircraft parts]. *Sbornik statei «Upravlenie tekhnologicheskimi protsessami mashinostroitel'nogo proizvodstva»* [Proceedings «Management of technological processes of machine-building production»]. Irkutsk, 1998, pp. 62–66.
3. Pashkov A.E. Ob osobennostyakh primeneniya Otechestvennoi i zarubezhnoi tekhnologii formoobrazovaniya obshivok i panelei samoletov [On the peculiarities of the application of Domestic and foreign technology of shaping aircraft skin and panels]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2015, no. 5(100), pp. 17–22.
4. Pashkov A.E., Malashchenko A.Yu., Pashkov A.A. K voprosu sozdaniya tsifrovyyh tekhnologii proizvodstva krupnogabaritnykh detalei karkasa i obshivki samoleta [On the issue of creating digital technologies for the production of large-sized parts of the frame and skin of the aircraft]. *Tekhnologiya metallov* [Technology of metals], 2021, no. 1, pp. 36–46.
5. Grebennikov D.S., Maksimenkov V.I. Formoobrazovanie panelei kryla dal'nemagistral'nogo samoleta [Shaping the wing panels of a long-haul aircraft]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University], 2019, vol. 15, no. 1, pp. 116–121.
6. Pashkov A.A. Modelirovanie protsessa formoobrazovaniya krupnogabaritnykh detalei dvoynoi krivizny na drobemetnykh ustanovkakh kontaktного tipa [Modeling of the process of forming large-sized parts of double curvature on shot-blasting installations of contact type]. *Tekhnologiya metallov* [Technology of metals], 2020, no. 12, pp. 19–28.
7. Pashkov A.E., Diyak A.Yu. Opredelenie parametrov drobeudarnogo formoobrazovaniya-uprochneniya pri pomoshchi CAD/CAM/CAE sistem [Determination of parameters of shot-impact shaping-hardening using CAD/CAM/CAE systems]. *Sbornik statei «Upravlenie tekhnologicheskimi protsessami mashinostroitel'nogo proizvodstva»* [Proceedings «Management of technological processes of machine-building production»]. Irkutsk, 1998, pp. 59–62.
8. Meguid S.A., G. Shagal, J.C. Stranart, J.Daly. Tree-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1999, P. 13. DOI 10.1016/S0168-874X(98)00057-2.
9. Baragetti S. Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2001, vol. 14, issue 1-3, pp. 51–63.
10. Miao H.Y., Larose S., Per-ron C. et al. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Adv. Eng. Softw.*, 2009, vol. 40, pp. 1023–1038.
11. Zhuo Chen., Yang Fan, Meguid S. A. Realistic Finite Element Simulations of Arc-Height De-velopment in Shot-Peened Almen Strips. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2014, vol. 136. DOI 10.1115/1.4028006.
12. Bhuvaraghan B., Srinivasan S. M., Prakash O. et al. Shot peening simulation using discrete and finite element methods. *Advances in Engineering Software*, 2010, vol. 41, issue 12, pp. 1266–1276.
13. Kasimov B. M. U., Muminov M.R., Shin I.G. Poverkhnostnoe uprochnenie detalei tekhnologicheskikh oborudovaniy i modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya pri drobeudarnoi obrabotke [Surface hardening of technological equipment parts and modeling of the stress state during shot blasting]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 150-letiyu so dnya rozhdeniya professora N.A. Vasil'eva* [Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of Professor N.A. Vasiliev]. Moscow, 2021, pp. 122–127.
14. Makaruk A.A., Samoilenko O.V., Ivanov Yu.N., Chashchin N.S., Minaev N.V. Metodika rascheta tekhnologicheskikh parametrov preventivnogo deformirovaniya uprochnyayemykh detalei tipa «stenka» [Method for calculating the technological

parameters of preventive deformation of hardened parts such as wall] *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2021, vol. 25, no. 1(156), pp. 8–16.

15. Makaruk A.A., Pashkov A.A., Khamaganov A.M., Samoilenko O.V. Opredelenie vnutrennikh silovykh faktorov, voznikayushchikh pri uprochnenii podkreplennykh rebami detalei [Determination of internal force factors arising during hardening of parts reinforced with ribs] *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 10(141), pp. 29–37.

16. Makaruk A.A., Pashkov A.A., Samoilenko O.V. Increasing the shape accuracy of the hardened parts of the frame by technological methods. *International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019*. Irkutsk, 2019, vol. 632, P. 012100. DOI 10.1088/1757-899X/632/1/012100.

17. Nazarov S.R., Shodmonkulov Z.A. Opredelenie glubiny deformatsionnogo uprochneniya na osnove energeticheskikh sootnoshenii drobeudarnoi obrabotki [Determination of the depth of deformation hardening based on the energy ratios of shot-impact treatment]. *Materialy dokladov 54-i Mezhduнародnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii prepodavatelei i studentov (v 2 t.)* [Materials of reports of the 54th International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students (In 2 vol.)]. Vitebsk, 2021, vol. 2, pp. 279–281.

18. Drozd M.S., Osipenko A.P. Analiticheskoe issledovanie napryazhennogo sostoyaniya pri vnedrenii uprugoi sfery v uprugo-plasticheskoe poluprostranstvo [Analytical study of the stress state during the introduction of an elastic sphere into an elastic-plastic half-space]. *Sbornik nauchnykh trudov «Metallovedenie i prochnost' metallov»* [Proceedings «Metallography and strength of metals»]. Volgograd, 1977, no. 8, pp. 58–68.

19. Matlin M.M., Mozgunova A.I., Moseiko V.O., Moseiko V.V., Lebskii S.L. Opredelenie ratsional'nykh tekhnologicheskikh rezhimov uprochnyayushchei drobeobrabotki stal'nykh detalei [Determination of rational technological modes of reinforcing shot processing of steel parts]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletins of the Volgograd State Technical University], 2014, no. 9(136), pp. 99–102.

20. Matlin M.M., Mozgunova A.I., Lebskii S.L. Prognozirovaniye parametrov uprochneniya detalei mashin putem poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya [Prediction of parameters of hardening of machine parts by surface plastic deformation]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletins of the Volgograd State Technical University], 2005, no. 3, pp. 52–55.

21. Lebedenko V.G. Matematicheskoe modelirovaniye protsessa formirovaniya geometricheskikh parametrov poverkhnostnogo sloya i parametrov uprochneniya pri obrabotke detalei drobi [Mathematical modeling of the formation of geometric parameters of the surface layer and hardening parameters during the processing of shot parts]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Don State Technical University], 2008, vol. 8, no. 4(39), pp. 202–212.

22. Kravchenko G.N., Kravchenko K.G. Vybory tekhnologicheskikh parametrov drobeudarnogo uprochneniya silovykh detalei aviatsionnykh konstruktov [The choice of technological parameters of shot-impact hardening of power parts of aircraft structures]. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal* [Flight. All-Russian Scientific and Technical Journal], 2018, no. 12, pp. 37–44.

23. Le Chi Vinh, Koltsov V.P., Nguyen Minh Hoang. Modelirovaniye formirovaniya osnovnykh parametrov kachestva poverkhnostnogo sloya pri drobeudarnom uprochnenii [Modeling of the formation of the main parameters of the quality of the surface layer during shot-impact hardening]. *Sbornik statei XIV Mezhduнародnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aviamashinostroeniye i transport Sibiri»* [Proceedings of XIV International Scientific and Technical Conference «Aircraft engineering and transport of Siberia»]. Irkutsk, 2020, pp. 104–112.

### Информация об авторах

**Кольцов Владимир Петрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск; e-mail: kolcov@ex.istu.edu.

**Ле Чи Винь**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск; e-mail: vinh\_istu@mail.ru.

**Стародубцева Дарья Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск; e-mail: starodybseva@ex.istu.edu.

**Нгуен Минь Хоанг**, магистрант кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск; e-mail: starodybseva@ex.istu.edu.

### Information about the authors

**Vladimir P. Koltsov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Technologies and Equipment of Machine-building Industries, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: kolcov@ex.istu.edu.

**Le Chi Vinh**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Technologies and Equipment of Machine-building Industries, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: vinh\_istu@mail.ru.

**Dar'ya A. Starodubtseva**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Technologies and Equipment of Machine-building Industries, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: starodybseva@ex.istu.edu.

**Nguyen Minh Hoang**, Master's Student of the Department of Technologies and Equipment of Machine-building Industries, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: starodybseva@ex.istu.edu.

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ТРАНСПОРТ**

**TRANSPORT**

## Разработка алгоритма управления регуляторами мощности испытательной станции тяговых электродвигателей подвижного состава

А.Л. Мартусов✉

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

✉aleksey.martusov@yandex.ru

### Резюме

В статье рассматривается вопрос энергетической эффективности регуляторов мощности, которые применяются на испытательных станциях тяговых электродвигателей подвижного состава. Проведенный анализ существующего оборудования показал, что в тиристорных преобразователях существуют коммутационные провалы в кривых синусоид питающего напряжения и несинусоидальность кривой тока. Наличие данных помех вызвано существующим интервалом коммутации, вследствие чего возникает междофазовое короткое замыкание коммутируемых фаз. Кроме того, существующие регуляторы мощности снижают действующее напряжение. Проведенный анализ работы предлагаемых регуляторов мощности в составе испытательной станции позволил составить эффективный алгоритм управления силовыми полупроводниковыми приборами, осуществляющими непосредственную передачу электрической энергии от промежуточного накопителя энергии на тяговые двигатели. Частота следования импульсов напряжения, которые прикладываются к обмоткам тяговых электродвигателей, выбрана таким образом, чтобы коэффициент пульсаций тока в обмотках тягового электродвигателя не превышал 2 % без использования сглаживающего реактора, что является отличительной особенностью применения управляемых выпрямителей, в которых для снижения коэффициента пульсаций используется сглаживающий реактор. Представленный математический анализ регуляторов мощности испытательной станции доказывает эффективность применения разработанного алгоритма управления силовыми полупроводниковыми приборами. Влияние на питающую сеть минимизировано за счет выбора соответствующей ширины импульсов управления силовыми полупроводниковыми приборами на каждом этапе работы тягового электродвигателя. Предлагаемый алгоритм управления позволяют не загружать питающую сеть дополнительными токами, обеспечивает высокую электромагнитную совместимость испытательной станции с питающей электрической сетью на всем диапазоне регулирования мощности.

### Ключевые слова

подвижной состав, испытательная станция, выпрямитель, тяговый двигатель, электромагнитная совместимость, коэффициент заполнения, математическая модель

### Для цитирования

Мартусов А.Л. Разработка алгоритма управления регуляторами мощности испытательной станции тяговых электродвигателей подвижного состава / А.Л. Мартусов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 60–69. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).60-69.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 1.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 8.09.2022 г.; принята к публикации: 9.09.2022 г.

## Development of an algorithm for controlling the power regulators in the testing station of rolling stock traction electric motors

A.L. Martusov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉aleksey.martusov@yandex.ru

### Abstract

The article deals with the issue of energy efficiency of power regulators used at test stations for rolling stock traction electric motors. The analysis of the existing equipment showed that in thyristor converters switching gaps exist in the sinusoid curves of the supply voltage and non-sinusoidality in the current curve. The presence of these interferences is caused by the existing switching interval, resulting in an interphase short circuit of the switched phases. Besides, the existing power regulators reduce the operating voltage. The analysis of the operation of the proposed power controllers as part of the test station made it possible to develop an effective control algorithm for power semiconductor devices that directly transfer electrical energy from an intermediate energy storage device to traction motors. The repetition rate of voltage pulses applied to the windings of traction electric motors is chosen in such a way that the current ripple factor in the traction motors windings does not exceed 2 % without using a smoothing reactor, which is a distinctive feature of the use of controlled rectifiers, in which a smoothing reactor is used to reduce the ripple factor. The presented mathematical analysis of the power controllers of the test station proves the effectiveness of the developed algorithm for controlling power semiconductor devices. The impact on the supply network is minimized by choosing

the appropriate width of the power semiconductor devices control pulses at each stage of the traction electric motors operation. The proposed control algorithm makes it possible not to load the supply network with additional currents providing high electromagnetic compatibility of the test station with the supply network over the entire range of power regulation.

### Keywords

rolling stock, testing station, rectifier, traction motor, electromagnetic compatibility, duty cycle, mathematical model

### For citation

Martusov A.L. Razrabotka algoritma upravleniya regulyatorami moshchnosti ispytatel'noi stantsii tyagovykh elektrodvigateli podvizhnogo sostava [Development of an algorithm for controlling the power regulators in the testing station of rolling stock traction electric motors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 60–69. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).60-69.

### Article info

Received: September 1, 2022; Revised: September 8, 2022; Accepted: September 9, 2022.

### Введение

Актуальной задачей дальнейшего развития железной дороги является повышение энергоэффективности оборудования, применяемого для ремонта подвижного состава, в частности, для ремонта тяговых электродвигателей (ТЭД). Целесообразно уменьшать операционные расходы компании ОАО «РЖД» при выполнении ремонтов различных узлов ТЭД подвижного состава за счет повышения качества контроля и методов оценки состояния оборудования в процессе испытания ТЭД на станции.

Качество контроля и оценки состояния узлов ТЭД с возможностью экспериментального получения характеристик и параметров ТЭД в процессе испытаний можно обеспечить за счет совершенствования структуры и разработки нового оборудования электромеханической системы испытательной станции. Для выполнения регламента испытаний ТЭД и управления технологическими процессами с применением новой структуры и оборудования станции необходима разработка системы, алгоритма управления силовыми полупроводниковыми линейным, вольтодобавочным преобразователями и регулятором тока в обмотках возбуждения ТЭД.

### Методика исследования

Сегодня разработаны способы, методы и правила проведения ремонта и испытания ТЭД, составлены государственные стандарты и внедрены схемы для проведения их испытаний. Известные технические решения не позволяют определить отдельные параметры машин. В связи с применением тяги поездов повышенной массы и скорости и новых технологий их вождения, для обеспечения идентификации ТЭД при компоновке секций целесообразно на испы-

тательной станции получать механические и рабочие характеристики машин.

При анализе известных технических решений по разработке структурной схемы силового оборудования испытательной станции выявлена целесообразность независимого возбуждения генератора, последовательного и независимого возбуждения двигателя при совершенствовании станции для более качественной реализации регламента испытаний ТЭД и получения технических характеристик электрических машин, которые работают в режиме двигателя и режиме генератора. К недостаткам данного технического решения стоит отнести следующее:

- во время непроводящего состояния тиристорных выпрямителей и при коммутации тока в тиристорных плечах выпрямителя электрический потенциал питающей сети не используется для необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии;

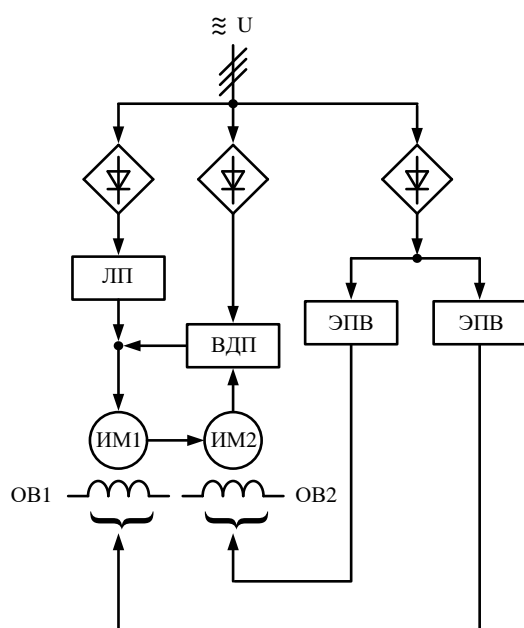
- в процессе коммутации тока тиристорами вторичные обмотки преобразовательных трансформаторов замкнуты накоротко, а электрическая энергия затрачивается на работу трансформатора в режиме короткого замыкания;

- неоправданные потери активной мощности и нелинейные искажения кривой переменного напряжения в питающей трехфазной электрической сети;

- сложность синхронизации импульсов управления тиристорами с нелинейными кривыми трехфазного переменного напряжения.

При разработке структурной схемы (рис. 1) силовых агрегатов электромеханической системы испытательной станции целесообразно предусмотреть возможность отдельного управления токами в обмотках якоря ма-

шин и в обмотках возбуждения для получения характеристик и параметров ТЭД в процессе выполнения испытаний.



**Рис. 1.** Функциональная схема силовых агрегатов электромеханической системы испытательной станции тяговых электродвигателей подвижного состава:

ЛП – линейный преобразователь, ВДП – вольтодобавочный преобразователь, ЭПВ – электрический полупроводниковый вариатор, ИМ – испытуемая машина, ОВ – обмотка возбуждения

**Fig. 1.** Functional diagram of the testing station electromechanical system power units in the traction electric motors of the rolling stock:

ЛП - linear converter, ВДП - booster converter,  
ЭПВ – electric semiconductor variator,  
ИМ – machine tested, ОВ - excitation winding

Известные математические выражения [1–3] позволяют приближенно рассчитать коэффициент мощности выпрямителя с нагрузкой, количественно оценить нелинейные искажения тока и фазовый сдвиг первой гармоники тока относительно первой гармоники напряжения в сети при работе выпрямителя с импульсно-фазовым управлением.

В известных энергетических показателях выпрямительных установок не учитывается та часть полной мощности на входе регулятора, которая не используется для необратимого преобразования электрической энергии в ее иной вид и для энергообмена в цепи в момент непродолжительного состояния силовых полупроводниковых приборов.

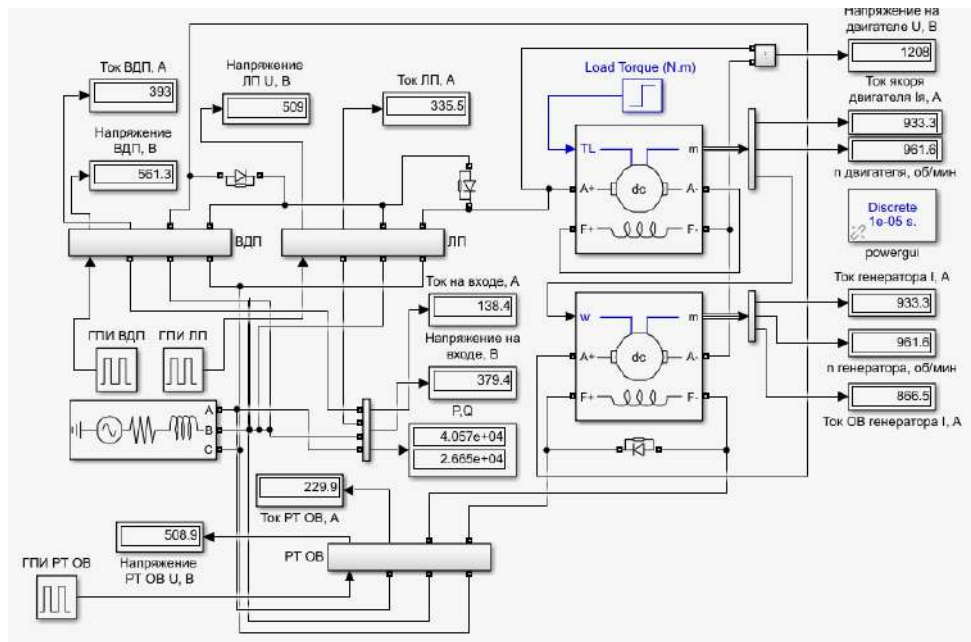
В процессе исследования целесообразно разработать новую конструкцию регуляторов мощности электромеханической системы испытательной станции, а также методику расчета характеристик ТЭД, энергетических характеристик элементов электромеханической системы испытательной станции и оценки электромагнитной совместимости испытательной станции с системой электроснабжения, исследовать и обосновать технические решения, позволяющие повысить использование электрического потенциала питающей сети и улучшить электромагнитную совместимость силового оборудования испытательной станции с системой электроснабжения.

На этапах пуска, трогания, разгона и регулирования мощности ТЭД на испытательной станции целесообразно использовать электрический потенциал на вводе испытательной станции вплоть до амплитуды кривой переменного напряжения, вместо снижения выпрямленного напряжения тиристорами известного управляемого выпрямителя.

На основании функциональной схемы (см. рис. 1) была построена математическая модель испытательной станции ТЭД с предлагаемыми регуляторами мощности в программе «Matrix laboratory» в среде Simulink. Далее представлена математическая модель испытательной станции ТЭД в номинальном режиме работы [4–9] (рис. 2).

При подаче тока на обмотку возбуждения генератора вступает в силу метод взаимной нагрузки, при котором скорость вращения двигателя-генератора достигает номинальной величины. Частота следования импульсов напряжения, которые прикладываются к обмоткам ТЭД выбрана таким образом, чтобы коэффициент пульсаций тока в обмотках ТЭД не превышал 2 % без использования сглаживающего реактора, что является отличительной особенностью применения управляемых выпрямителей, в которых для снижения коэффициента пульсаций используется сглаживающий реактор.

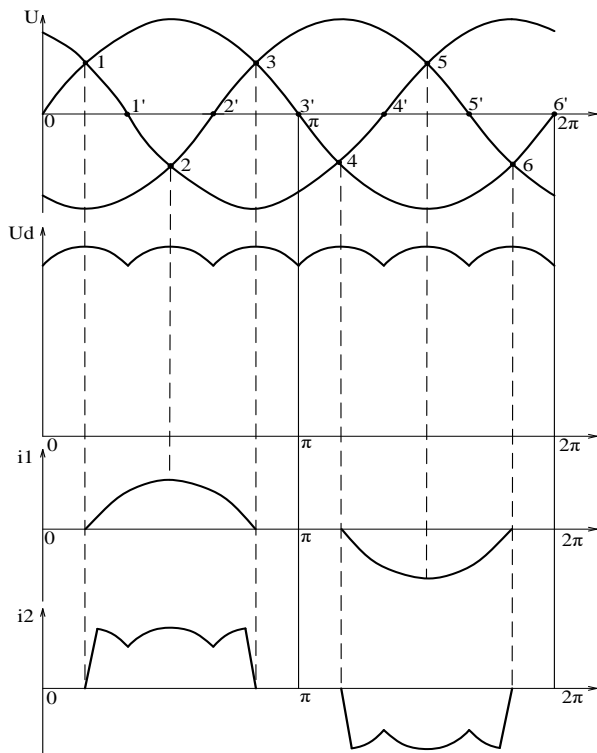
При отборе энергии от накопителя напряжение на выводах  $C$  снижается до номинального напряжения  $380 \cdot 1,35 = 513$  В. По временным осциллограммам напряжения и тока видно, что отпирание и запирающие диодных плеч выпрямителя происходит по мере снижения напряжения на промежуточном накопителе и уменьшении напряжения входного сопротив-



**Рис. 2.** Математическая модель испытательной станции тяговых электродвигателей в номинальном режиме работы:  
 $K_z(ЛП) = 0,15$ ;  $K_z(ВДП) = 0,0$ ;  $I_{ОВГ} = 250$  А

**Fig. 2.** Mathematical model of the test station of traction motors in nominal mode works

ления испытательной станции в точках 1 и 3, 4 и 6 (рис. 3).



**Рис. 3.** Временные диаграммы выпрямленного напряжения и тока

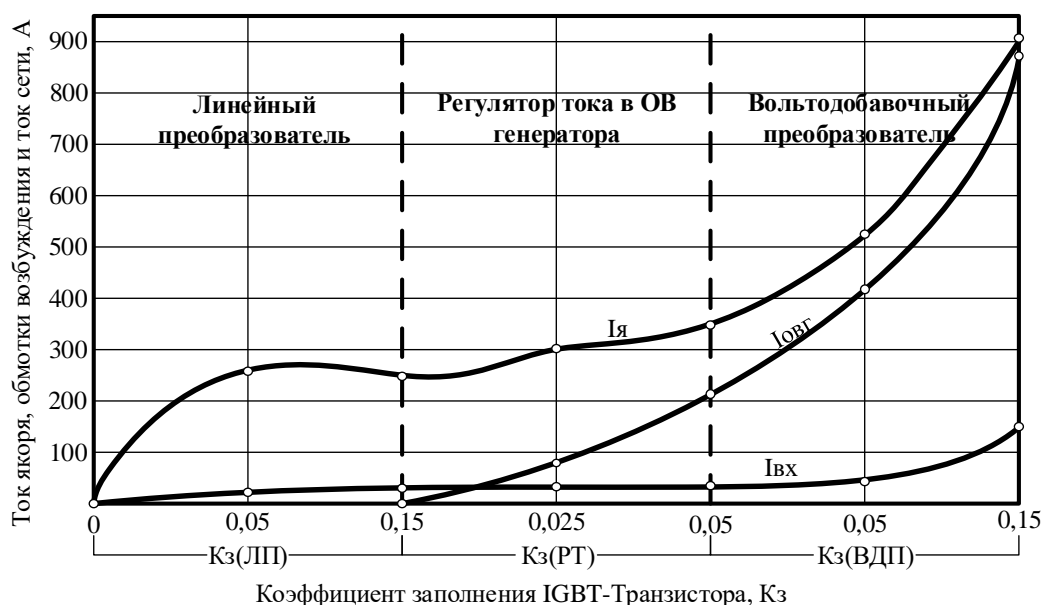
**Fig. 3.** Rectified voltage and current timing diagrams

### Результаты исследования

Математическое моделирование электромеханической системы испытательной станции позволяет понять, насколько эффективно используется электрический потенциал питающего напряжения. Данный эффект достигается за счет составленного алгоритма испытаний, позволяющего минимизировать токи, потребляемые из сети (рис. 4).

Моделирование процесса работы испытательной станции начинается с зарядки всех промежуточных накопителей (ПН) регуляторов. При подаче напряжения на испытательную станцию ток заряда ПН поддерживается на заданном уровне ограничителем тока заряда (ОТЗ). В это время на IGBT-транзистор не подается импульс управления ( $K_z = 0$ ). Напряжение на выводах ПН увеличивается до амплитуды переменного трехфазного напряжения сети. Дiodы трехфазного мостового выпрямителя запираются, а входное электрическое сопротивление электромеханической системы испытательной станции становится бесконечно большим. После зарядки промежуточного накопителя подается импульс управления на IGBT-транзистор с помощью блока генератора прямоугольных импульсов линейного преобразователя (ГПИ ЛП) (см. рис. 2). Начинается отбор энергии от про-





**Рис. 4.** Алгоритм изменения тока якоря, обмотки возбуждения и тока на входе испытательной станции от коэффициента заполнения IGBT-транзистора  
**Fig. 4.** Algorithm for changing the armature current, field winding and current at the input of the test stations on the fill factor of the IGBT transistor

межуточного накопителя на цепь «двигатель – генератор». Исследованиями установлено, что при коэффициенте заполнения импульсов управления IGBT-транзистора линейного преобразователя  $K_z(\text{ЛП}) = 0,05$  величина пускового тока  $I_{я}$  не превышает 271 А, вал машин начинает плавно вращаться в основном за счет энергии, накопленной в ПН. Напряжение на выводах ПН снижается, поэтому угол проводимости диодов трехфазного выпрямителя плавно увеличивается от 0 до 120 электрических градусов. Входное электрическое сопротивление электромеханической системы уменьшается. В момент пуска двигателей из трехфазной сети потребляется незначительный линейный ток, который не превышает 10 А.

В интервале работы испытательной станции при  $0 < K_z(\text{ЛП}) < 0,15$  участвуют ЛП, двигатель и генератор. Ток в обмотке возбуждения генератора равен 0. Для эффективности пуска двигателей ток в обмотке возбуждения генератора отсутствует для того, чтобы не загружать питающую сеть большими токами. При увеличении  $K_z(\text{ЛП})$  происходит разгон двигателя и генератора.

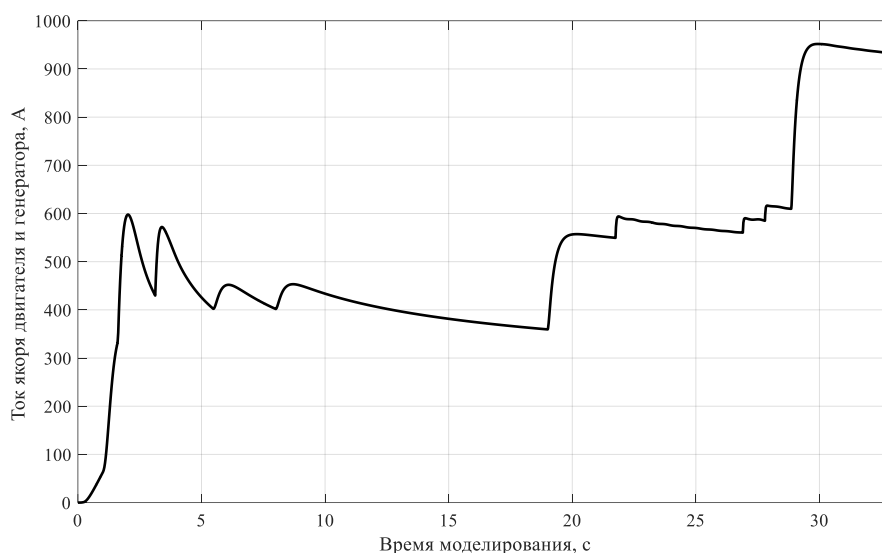
В интервале работы испытательной станции при  $0 < I_{овг} < 229$  А происходит плавное изменение тока в обмотке возбуждения генератора с помощью блока генератора прямоуголь-

ных импульсов регулятора тока (ГПИ РТ) обмотки возбуждения, скорость вращения двигателей достигает половины от номинальной скорости вращения ( $n \sim 400$  об/мин). Далее представлены математические модели испытательной станции с изменением тока в обмотке возбуждения генератора в диапазоне от 0 до 230 А. Посредством математического моделирования появляется возможность оценить эффективность работы регуляторов мощности испытательной станции тяговых электродвигателей. Следующим этапом является включение в работу испытательной станции включается ВДП, с помощью блока ГПИ ВДП. Математическая модель испытательной станции моделирует процесс испытания двигателя и генератора, при котором ток в обмотке возбуждения генератора равен 870 А. При этом ток якоря имеет значение 933,3 А, а скорость вращения вала якоря двигателя и генератора 961,6 об/мин. Для дальнейшего исследования регуляторов мощности испытательной станции представлены графические зависимости основных показателей. На рис. 5 показана зависимость тока, протекающего в цепи якоря и обмотки возбуждения двигателя, а также в цепи якоря генератора, от времени моделирования. На графике видно, как повышение коэффициента заполнения IGBT-транзистора линейного преобразователя влияет на изменение тока в

якорной цепи двигателя и генератора. В период времени от 2,5 с. до 10 с. происходит увеличение коэффициента заполнения IGBT-транзистора линейного преобразователя с помощью системы управления в диапазоне от 0 до 15 %, ток в цепи якоря изменяется в диапазоне от 400 А до 600 А.

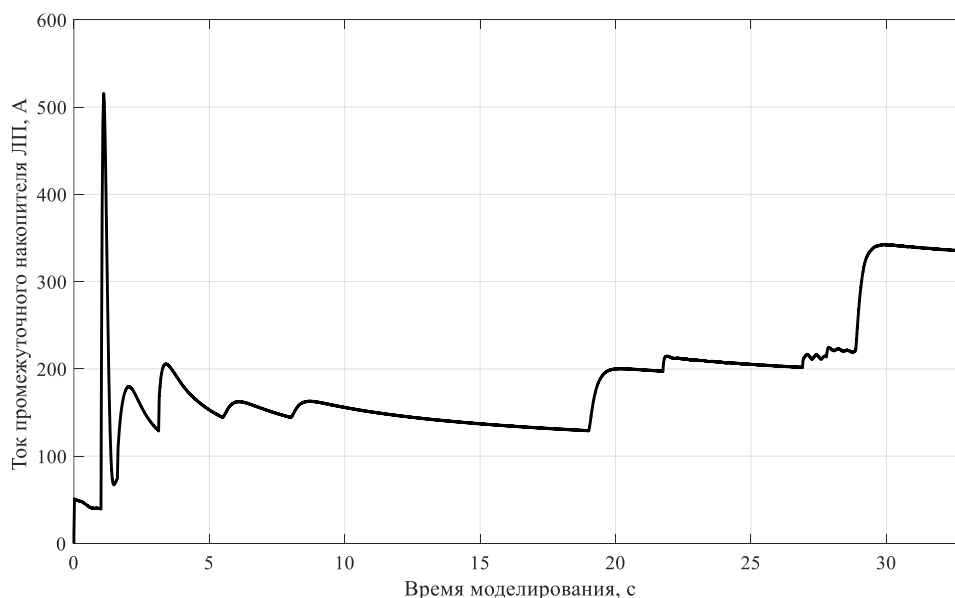
На рис. 6 и 7 показаны графические зави-

симости токов промежуточных накопителей линейного и вольтодобавочного преобразователей. На рис. 6 изменяется ток, поступающий с линейного преобразователя в якорную цепь двигателя и генератора на всем диапазоне моделирования. Ток с промежуточного накопителя линейного преобразователя не превышает 335,5 А в номинальном режиме работы.



**Рис. 5.** График зависимости тока якоря двигателя и генератора от времени моделирования

**Fig. 5.** Plot of motor anchor and generator current versus simulation time



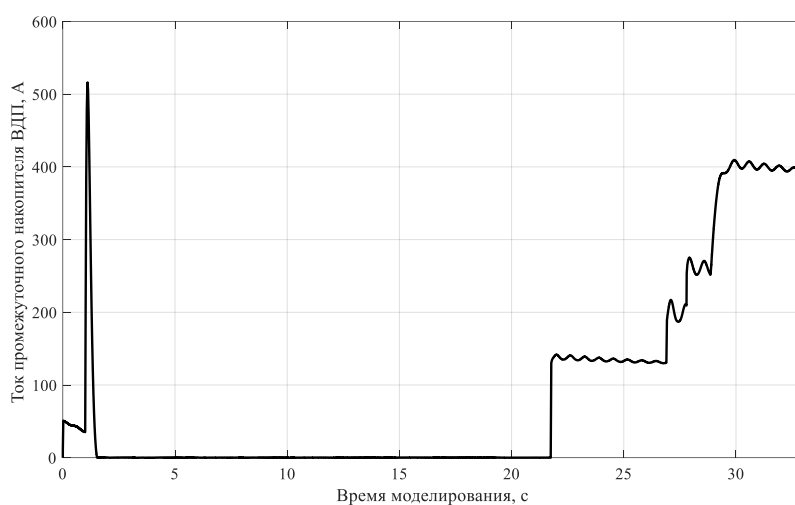
**Рис. 6.** График зависимости тока промежуточного накопителя линейного преобразователя от времени моделирования

**Fig. 6.** Graph of the dependence of the intermediate storage of the linear converter current on time modeling

На рис. 7 можно увидеть изменение тока промежуточного накопителя вольтодобавочного преобразователя от времени моделирования. Вольтодобавочный преобразователь вступает в работу только в конце моделирования, для вывода электрических машин на номинальный режим.

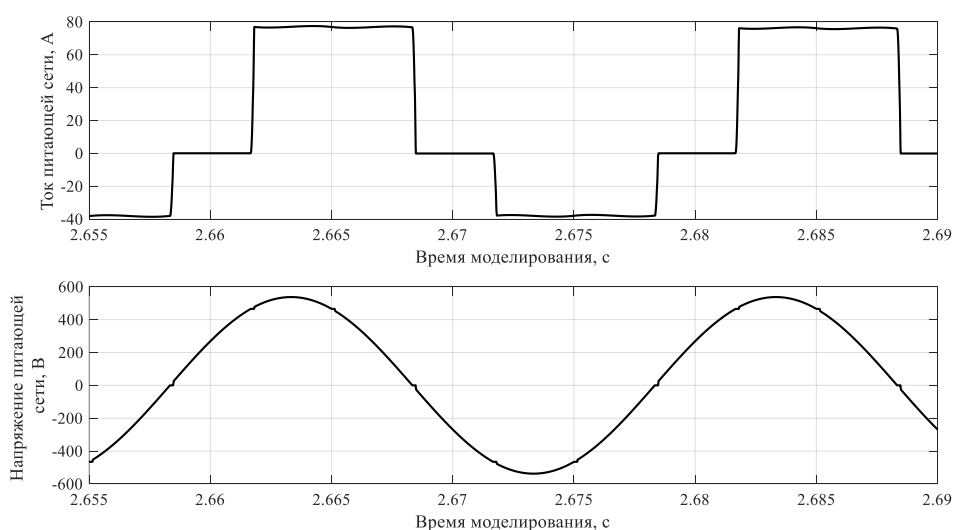
По осциллограммам видно оказываемое влияние предлагаемых регуляторов мощности на питающую сеть. Кривая тока не отстает от кривой напряжения, а также отсутствует негативное влияние на кривую напряжения, которым отличается регулятор мощности на тиристорах. Для плавного и независимого регулирования тока в обмотках возбуждения ТЭД разработан

алгоритм управления IGBT-транзисторами VT3, VT4. Работа каналов широтно-импульсного регулирования (ШИР) напряжения организована последовательно, и ограничена полупериодом для каждого канала. Диапазон регулирования ширины импульсов напряжения управления равен от 0 до 50 % от максимума. После запуска микроконтроллер осуществляет процедуру инициализации, выполняющую настройку режимов работы микроконтроллера и периферийных устройств, в частности таймера TMR0, ведущего отсчет периода формирования первого импульса ШИР, а также объявление констант и переменных. На рис. 8 представлены осциллограммы тока и напряжения питающей



**Рис. 7.** График зависимости тока промежуточного накопителя вольтодобавочного преобразователя от времени моделирования

**Fig. 7.** Graph of the dependence of the intermediate storage of the booster converter current on time modeling



**Рис. 8.** Осциллограммы напряжения и тока питающей сети

**Fig. 8.** Mains voltage and current oscillograms

сети, от которой работает испытательная станция на предлагаемых регуляторах мощности.

После завершения инициализации выполняет циклическое выполнение программы формирования ШИР. Цикл программы формирования ШИР состоит из выполнения подпрограмм:

1. Ожидание прерывания по переполнению таймера TMR0 (период формирования одного импульса ШИР).

2. Обработки прерывания таймера TMR0, перезапуска таймера TMR0, вывода на порт PORTC данных текущего состояния каналов ШИР.

3. Считывание данных аналого-цифрового преобразователя и обновления параметров регулирования. Если параметры регулирования изменены, то обнуляются счетчики периода и ширины импульсов.

В программе MatLab блоком управления модели является «Pulse Generator» [10–14], который генерирует прямоугольные импульсы с регулярными интервалами для управления IGBT-транзистором с применением драйвера. Параметры формы сигнала блока, амплитуда, ширина импульса, период и задержка фазы, определяют форму выходного сигнала. В модели испытательной станции данный блок

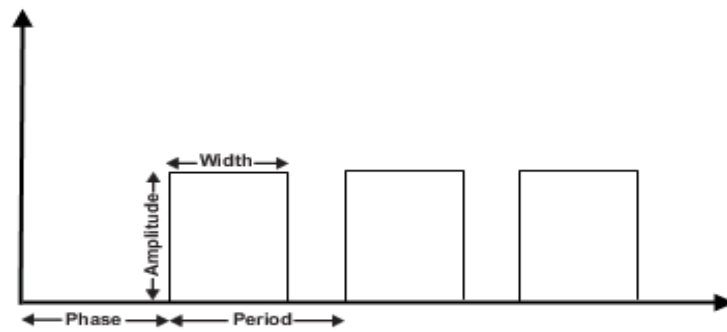


Рис. 9. Временная диаграмма импульсов управления  
Fig. 9. Timing diagram of control pulses

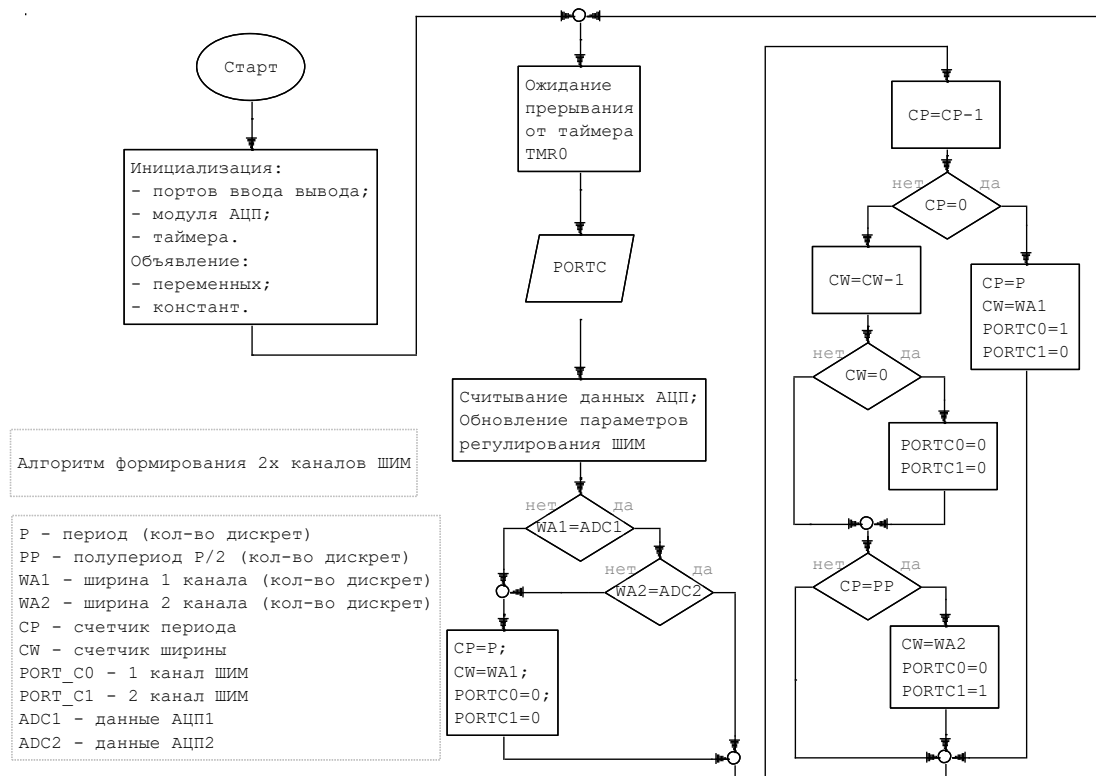


Рис. 10. Алгоритм управления IGBT-транзисторами  
Fig. 10. IGBT-transistors control algorithm

представляет систему управления IGBT-транзистора. На рис. 9 представлена диаграмма, показывающая, как каждый параметр импульсов влияет на форму сигнала. Блок Pulse Generator может генерировать скалярные, векторные или матричные сигналы любого реального типа данных.

Чтобы сгенерировать скалярный сигнал, используются скаляры для указания параметров формы волны. Чтобы произвести векторный или матричный сигнал, используются, соответственно, векторы или матрицы для определения параметров формы сигнала. Каждый элемент параметров формы импульсов влияет на соответствующий элемент выходного сигнала. Например, первый элемент векторного параметра амплитуды определяет амплитуду первого элемента векторного выходного импульса. Все параметры формы сигнала должны иметь одинаковые размеры после скалярного расширения (рис. 10).

Тип данных вывода аналогичен данным параметра Amplitude [15–18]. Выходные данные блока сгенерированы в режиме на основе времени или выборки, что определяется параметром типа Pulse. В режиме, основанном на времени, Simulink вычисляет выход блока только в те моменты, когда выход фактически изменяется. Этот подход приводит к меньшему количеству вычислений для вывода блока за период времени моделирования.

### Заключение

Получено новое научно обоснованное техническое решение, направленное на совершенствование технологии ремонта ТЭД подвижного состава. Разработанный алгоритм управления испытательной станцией ТЭД подвижного состава, позволяет эффективно использовать электрический потенциал питающей сети, а также способен минимизировать потребляемые токи во время пуска и разгона ТЭД.

### Список литературы

1. Маевский О.А. Энергетические характеристики вентильных преобразователей. М. : Энергия, 1978. 320 с.
2. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей. Новосибирск: НГУ, 1990. 219 с.
3. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. СПб. : Питер, 2009. Т. 2. 431 с.
4. Теоретические основы электротехники / Под ред. П.А. Ионкина. М.: Высшая школа, 1976. Т. 1. 544 с.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М. : Высшая школа, 1996. 638 с.
6. Бадер М.П. Повышение эффективности тягового электроснабжения постоянного тока и обеспечение электромагнитной совместимости // Электроснабжение и водоподготовка. 2000. № 2. С. 62–66.
7. Prasuna P.V., Rama Rao J.V.G., Lakshmi Ch.M. Improvement in Power Factor & THD Using Dual Boost Converter // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2012. Vol. 2 (4). P. 2368–2376.
8. Mohanraj K., Danya Bersis C., Sekhar S. Simulation of Open Loop and Feed-BackControlled Bridgeless PFC Boost Converter // Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES. Springer, 2014. P. 29–38.
9. Jennela S., Raj Kumar V. THD Analysis of One-Cycle and PWMControlled Active Power Filters // Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES. Springer, 2014. P. 225–236.
10. Teigelkötter J., Sprenger D. Мощные преобразователи на IGBT-транзисторах для применения на железнодорожном подвижном составе. Мюнхен: Siemens AG, 2000.
11. Умов Н.А. Избранные сочинения. М. ; Л. : Гостехиздат, 1950. 571 с.
12. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field / Philosophical Transactions of the Royal Society. London: 175, 1884. P. 343–361.
13. 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: 15.08.2022).
14. Алексеева Т.Л., Рябченко Н.Л. Энергосберегающее использование электрической энергии // Universum: Технические науки. 2016. № 11(32). С. 25–30.
15. Alekseeva T., Ryabchyonok N., Astrakhantsev L. Technology of Electric Power Efficient Use in Transport. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. P. 120–133.
16. 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.
17. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. Т. 2. 307 с.
18. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь. М. : Транспорт, 1987. 479 с.

### References

1. Maevskii O.A. Energeticheskie kharakteristiki ventil'nykh preobrazovatelei [Energy Characteristics of Valve Converters]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 320 p.
2. Zinov'ev G.S. Pryanые metody rascheta energeticheskikh pokazatelei ventil'nykh preobrazovatelei [Direct methods for calculating the energy performance of valve converters]. Novosibirsk: NGU Publ., 1990. 219 p.

3. Demirchan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical Bases of an Electrical Engineering]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2009, vol. 2, 431 p.
4. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1976, vol. 1, 544 p.
5. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1996. 638 p.
6. Bader M.P. Povyshenie effektivnosti tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka i obespechenie elektromagnitnoi sovместимости [Increasing the efficiency of direct current traction power supply and ensuring electromagnetic compatibility]. *Elektrosnabzhenie i vodopodgotovka* [Power supply and water treatment], 2000, no. 2, pp. 62–66.
7. Prasuna P.V., Rama Rao J.V.G., Lakshmi Ch.M. Improvement in Power Factor & THD Using Dual Boost Converter. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2012, vol. 2 (4), pp. 2368–2376.
8. Mohanraj K., Danya Bersis C., Sekhar S. Simulation of Open Loop and Feed-Back Controlled Bridgeless PFC Boost Converter. *Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES*. Springer, 2014, pp. 29–38.
9. Jennela S., Raj Kumar V. THD Analysis of One-Cycle and PWM Controlled Active Power Filters. *Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES*. Springer, 2014, pp. 225–236.
10. Teigelkötter J., Sprenger D. Powerful IGBT converters for railway rolling stock applications. Munich: Siemens AG, 2000.
11. Umov N.A. Izbrannye sochineniya [Selected Works]. Moscow; Leningrad: Gostekhizdat Publ., 1950. 571 p.
12. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. London: 175, 1884, pp. 343–361.
13. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Yakobchuk K.P., Astrakhantsev L.A. Utochneniy zakon sokhraneniya energii (Elektronnyy 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 August 15, 2022).
14. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L. Energoberegayushchee ispol'zovanie elektricheskoi energii [Energy-saving use of electrical energy]. *Universum: Tekhnicheskie nauki* [Universum: Technical sciences], 2016, no. 11(32), pp. 25–30.
15. Alekseeva T., Ryabchenok N., Astrakhantsev L. Technology of Electric Power Efficient Use in Transport. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT*, 2017, pp. 120–133.
16. 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.
17. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and Converter Technology]. Moscow; UMTS ZHDT Publ., 2015. Vol. 2. 307 p.
18. Shakhunyants G.M. Zheleznodorozhnyi put' [Railway track]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p.

#### Информация об авторах

**Мартусов Алексей Леонидович**, ассистент 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

**Aleksei L. Martusov**, assistant lecturer 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).

## Применение энергосберегающих технологий при обслуживании и ремонте подвижного состава

Е.А. Милованова✉, В.Е. Гозбенко

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

✉evakami@yandex.ru

### Резюме

Реализация компанией «ЛокоТех» пилотного проекта «Цифровое депо» ставит своей задачей комплексное применение решений для более эффективной организации производственных процессов. Используемые в настоящее время на железнодорожном транспорте технические устройства для мойки и очистки как подвижного состава, так и его деталей при достаточно большой зоне охвата номенклатуры изделий предполагают обработку объектов либо струей жидкости с моющим веществом, либо их «купание» в моющей среде. Существующая технология очистки и конструктивное исполнение моечных машин при этом не позволяют повысить коэффициент полезного действия таких устройств, а агрессивные свойства жидкостей, применяемых в технологическом процессе, вырабатываются не полностью. Решение видится в интенсификации технологических процессов мойки и очистки деталей подвижного состава путем рациональной организации структуры потоков моющей жидкости с целью повышения их производительности. Ее увеличение также обеспечивается созданием большой удельной поверхности контакта фаз «газ – жидкость». Таким образом, речь идет о повышении эффективности технологии очистки путем использования конструктивных возможностей аппаратов, а не за счет повышения агрессивности рабочей жидкости. В статье приводится оценка конструктивных признаков традиционных схем газлифтных аппаратов, разработаны подходы к оптимальному секционированию аппаратов, т. е. к выявлению в их циркуляционном контуре зон для более выгодного размещения объектов жидкостной обработки, предложено применение аппаратов с принудительным газоснабжением для осуществления технологических процессов в условиях промышленных производств.

### Ключевые слова

проект «Цифровое депо», мойка и очистка подвижного состава, конструкции моечных аппаратов и машин, аппараты газлифтного типа, интенсификация процесса обработки

### Для цитирования

Милованова Е.А. Применение энергосберегающих технологий при обслуживании и ремонте подвижного состава / Е.А. Милованова, В.Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 70–79. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).70-79.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 2.07.2022 г.; поступила после рецензирования: 28.09.2022 г.; принята к публикации 29.09.2022 г.

## The use of energy-saving technologies in the maintenance and repair of rolling stock

Е.А. Milovanova✉, V.E. Gozbenko

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

✉evakami@yandex.ru

### Abstract

The implementation of the pilot project «Digital Depot» by the company «Locotech» is aimed at the integrated application of solutions for more efficient organization of production processes. The technical devices currently used in railway transport for washing and cleaning both rolling stock and its parts, with a sufficiently large coverage area of the product range, affect the objects being processed either with a jet of liquid with a detergent, or involve "bathing" the object in a cleansing medium. The existing cleaning technology and the design of washing machines do not allow to increase the efficiency of such devices, and the aggressive properties of liquids used in the technological process are not fully created. The solution is seen in the intensification of technological processes of washing and cleaning of rolling stock parts by rationally organizing the structure of washing fluid flows to increase their productivity. The increase in productivity is also ensured by the creation of a large specific contact surface of the gas-liquid phases. Thus, we are talking about improving the efficiency of cleaning technology by using the design capabilities of the devices, and not by increasing the aggressiveness of the working fluid. The article provides an assessment of the design features of traditional schemes of gas lift apparatuses, approaches to optimal partitioning of apparatuses, to identify zones in their circulation circuit for the most advantageous placement of liquid treatment facilities, the use of devices with forced gas supply for the implementation of technological processes in industrial production conditions is proposed.

**Keywords**

the Digital Depot project, washing and cleaning of rolling stock, washing machines and machinery designs, gas lift type apparatuses, intensification of the processing process

**For citation**

E.A. Milovanova, V.E. Gozbenko *Primenenie energosberegayushchikh tekhnologii pri obsluzhivanii i remonte podvizhnogo sostava* [The use of energy-saving technologies in the maintenance and repair of rolling stock]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 70–79. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).70-79.

**Article info**

Received by: July 2, 2022; Revised: September 28, 2022; Accepted: September 29, 2022.

**Введение**

В ОАО «РЖД» принята Программа повышения экологической ответственности. Согласно принятой стратегии, решено снизить нагрузку на окружающую среду от всех видов деятельности в два раза к 2030 г.

На протяжении последних лет ведется планомерная работа по расширению полигона возобновляемых источников энергии в рамках проекта «Умный вокзал», реализуется программа ликвидации угольных котельных, организован селективный сбор отходов в офисных помещениях и на вокзалах [1], осуществляется разработка подходов к созданию перспективных видов транспорта [2, 3].

Также группой компаний «ЛокоТех» с 2018 г. реализуется пилотный проект «Цифровое депо», который ставит своей задачей комплексное применение решений, позволяющих минимизировать влияние обслуживающего персонала на качество процесса ремонта подвижного состава при повышении эффективности организации производственных процессов.

Подобное осуществимо путем системного подхода к организации технологического процесса, а именно к рациональной организации цеховых (участковых) технологических потоков при обязательном подборе высокопроизводительного, энергосберегающего и экологически безопасного оборудования как для персонала, так и окружающей среды.

В связи с этим особый интерес вызывает внедрение безотходных производств и экономических технологических процессов с возможностью совмещения нескольких технологических операций [4].

Применяют в технологических операциях системы, в которых используется принцип взаимодействия газа и жидкости [5]. Для разделения газовых смесей и выделения ценных компонентов успешно применяется физическая или

химическая абсорбция [6], также широкое распространение получили такие химические реакции, как гидроформилирование, окисление, алкилирование и др. [7]. Осуществляются эти технологии в реакторах различного типа (реакторы смешения и вытеснения, каскады реакторов и секционированные аппараты).

Газлифтные аппараты осуществляют высокое контактное взаимодействие между газом и жидкостью, отличаются низким энергопотреблением, а конструкция обеспечивает простоту дооснащения системами теплообмена и отсутствие подвижных деталей. Они также незаменимы при очистке и утилизации образующихся выбросов и отходов [8–10], именно поэтому такие аппараты широко применяются в различных отраслях.

В связи с большим количеством сточных вод и, как следствие, высокими экономическими потерями перед компанией ОАО «РЖД» остро стоит вопрос создания и применения систем замкнутого водооборота. Кроме того, речь идет и о рациональном использовании водных ресурсов. Так, на Восточно-Сибирской железной дороге ежегодное водопотребление с последующим образованием сточных вод составляет около 25 млн. м<sup>3</sup>, а широко применяемые методы – отстаивание и фильтрование – не обеспечивают должный уровень очистки сточных вод.

Решение проблемы в данной области видится в усовершенствовании действующих и разрабатываемых методов очистки сточных вод, в изменении технологии проектирования и создания машин, повышающих уровень безопасности их эксплуатации, в том числе путем обеспечения экологической защиты обслуживающего персонала.

Широкое разнообразие конструкций аппаратов и машин для осуществления технологических процессов очистки деталей и узлов позволяет выделить из их числа наиболее рас-



пространенные на железнодорожном транспорте [11–13].

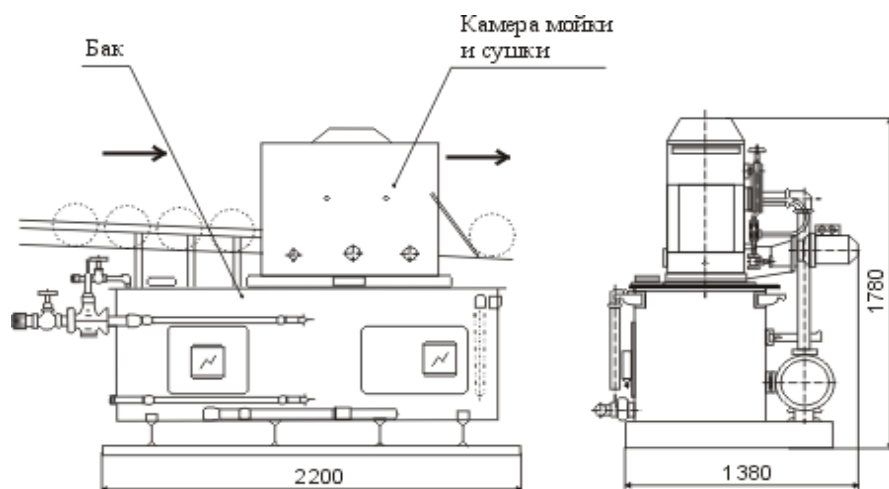
Моечная машина МСП-1 (рис. 1) используется для очистки и сушки вагонных и локомотивных подшипников буксовых узлов.

Допускается как самостоятельная работа моечной машины, так и совместная с позицией выпрессовки подшипников и машиной для мойки букс, при этом все операции цикла выполняются автоматически. Подача объектов обработки в устройство происходит по двум направляющим, при этом буксовые подшипни-

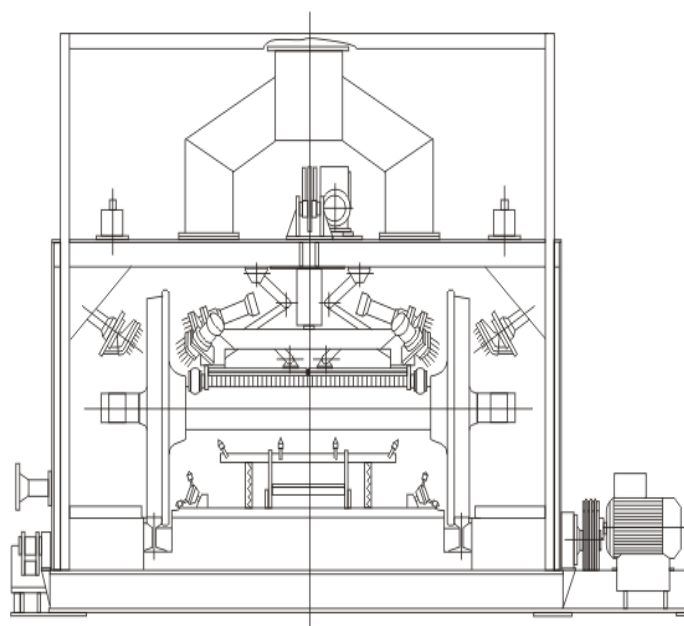
ки пересекают моечную камеру, в которой обеспечивается их вращение и обработка моющей средой посредством сопловой системы при температуре до 95 °С. Далее буксовые подшипники направляются в сушильную камеру для обработки сжатым воздухом.

Для очистки деталей экипажной части предназначена моеющая камера (рис. 2).

Очистка поверхности колесных пар производится при помощи металлических щеток. Работа установки может осуществляться как самостоятельно, так и в составе автоматизиро-



**Рис. 1.** Моечная машина МСП-1 для промывки и сушки роликовых подшипников буксовых узлов подвижного состава  
**Fig. 1.** Washing machine MSP-1 for washing and drying roller bearings of axle box assemblies of the rolling stock



**Рис. 2.** Камера очистки колесных пар подвижного состава  
**Fig. 2.** Rolling stock wheelset cleaning chamber

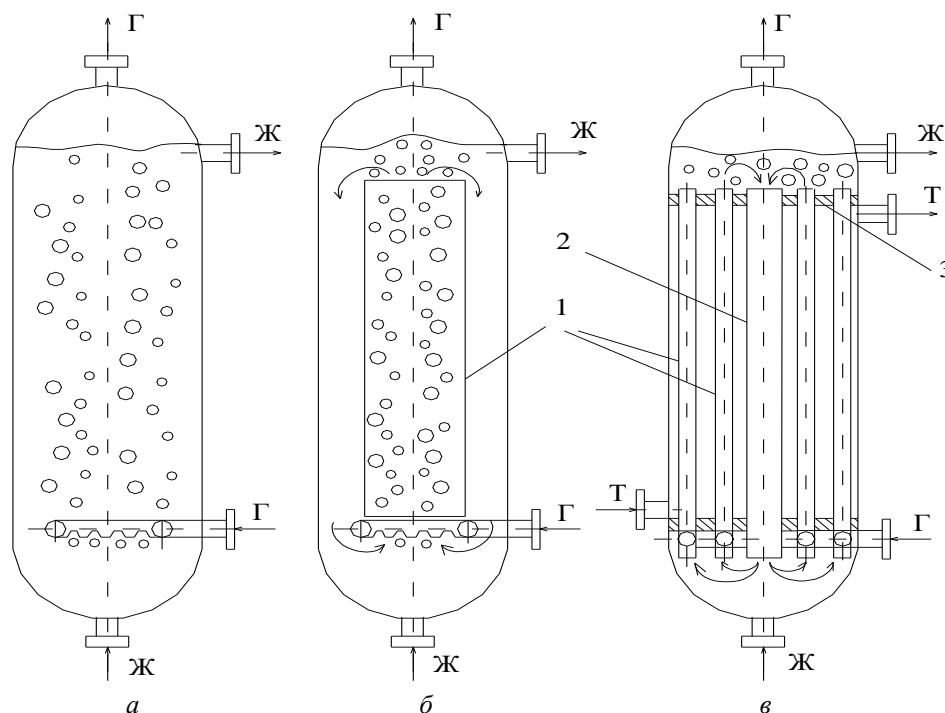
ванной поточной линии.

Мойка поверхностей железнодорожных вагонов, колесных тележек, узлов и деталей подвижного состава перед их демонтажем и разборкой зачастую осуществляется с применением моечного комплекса. Его основой является гидравлическая установка высокого давления (30–150 бар), которая представляет собой агрегат, подключаемый к электрической и водопроводной сетям; рабочими органами таких установок являются всевозможные распылительные головки. Предусмотрен нагрев воды и парогенератор (нагревательный котел на дизельном топливе), а для удаления особо тяжелых загрязнений – работа со щелочными моющими препаратами.

Приведенный обзор моечных машин и устройств очистки деталей подвижного состава показывает, что конструктивно они требуют расположения в горизонтальной плоскости с занятием больших производственных площадей, которые, кроме позиции непосредственно для уста-

новки моечной машины, требуют и пространства для их обслуживания и безопасного размещения обслуживающего персонала для предотвращения воздействия агрессивных жидкостных сред при брызгоуносе [14].

Подобное техническое исполнение моечных машин ограничивает возможности использования энергии течения жидкостной среды с целью повышения эффективности технологического процесса, так как в основном предполагает обработку объектов либо струей жидкости с моющим веществом, либо их «купание» в моющей среде. Существующая технология очистки и конструктивное исполнение моечных машин при этом не позволяют повысить коэффициент полезного действия таких устройств, а агрессивные свойства жидкостей, применяемых в технологическом процессе, вырабатываются не полностью. Возникающие единичные попытки внедрения рециркуляции не могут улучшить сложившуюся ситуацию, которая усложняется необходимостью дополнительных затрат энергии. Результатом



**Рис. 3.** Принципиальные схемы газлифтных реакторов (1 – зона восходящего потока, 2 – зона нисходящего потока, 3 – перегородка; Ж – линия подачи-отвода рабочей жидкости, Г – линия нагнетания-отвода рабочего газа, Т – линия движения теплоносителя)  
а – реактор с открытой зоной барботаж; б – реактор с циркуляционной трубой;  
в – кожухо-трубный реактор

**Fig. 3.** Schematic diagrams of gas lift reactors (1 – upstream zone, 2 – downstream zone, 3 – septum; Zh – the line of supply-discharge of the working fluid; G – the line of injection-discharge of the working gas; T – the line of movement of the coolant)  
a – reactor with an open bubbling zone; b – reactor with a circulation pipe; c – shell-and-tube reactor

является большой объем токсичных стоков производства в виде агрессивных текучих сред.

Моечные машины для очистки узлов и деталей подвижного состава железных дорог имеют низкую степень унификации, что влечет увеличение себестоимости оборудования.

Решение задачи видится в интенсификации технологических процессов мойки и очистки деталей подвижного состава путем рациональной организации структуры потоков моющей жидкости для повышения их производительности.

Достижение цели основывается на исследовании влияния гидродинамических факторов и конструктивных параметров газлифтных аппаратов на производительность процесса очистки и мойки.

Классические схемы исполнения газлифтных реакторов [11, 15] отличаются следующими обобщенными конструктивными особенностями: вертикально расположенная емкость (реактор), как правило, цилиндрической формы с перегородкой, создающей зоны восходящего и нисходящего газожидкостных потоков (ЗВП и ЗНП), с возможностью сообщения восходящей и нисходящей зон в верхней (над перегородкой) и нижней (под перегородкой) частях реактора. При отсутствии конструктивной перегородки (материальной границы) в реакторе происходит взаимодействие восходящих и нисходящих потоков во всем его объеме. По барботеру, расположенному у днища реактора, в зоне нисходящего потока подается газ (пар), который обеспечивает создание движущегося циркуляционного контура газожидкостной смеси.

Принципиальные схемы газлифтных реакторов приведены на рис. 3.

Лучшие технические решения, чья оригинальность подтверждается патентами на изобретение и выданными авторскими свидетельствами [16–18] совокупно представлены в принципиальных схемах классических конструкций, а повышение интенсивности течения жидкости традиционно осуществляется за счет применения различного рода проточных элементов и насадок с выполненными в них технологическими отверстиями, а также путем осуществления других видов модификаций.

Признанными достоинствами реакторов, выполненных по традиционным схемам являются:

– техническая простота конструкции;

– легкость ее модификации путем внесения в конструкцию реакторов дополнительных элементов, позволяющих использовать устройства для широкого перечня нужд в различных отраслях промышленности;

– возможность плавного регулирования газосодержания путем изменения интенсивности подачи газа (пара);

– неподвижность базовых элементов конструкции;

– возможность выработки агрессивных свойств рабочей жидкости за счет оптимального выбора числа циклов ее циркуляции в конструкции редулятора.

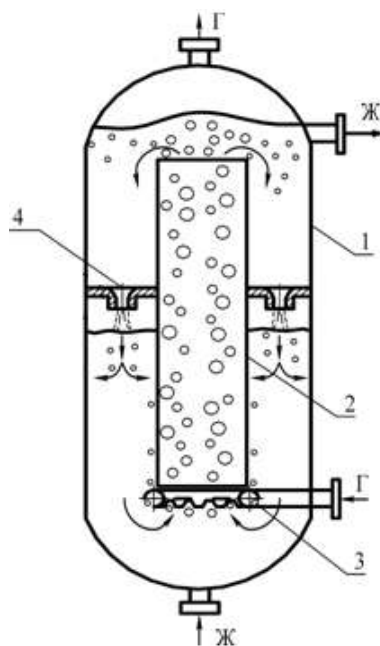
Предлагаемое совершенствование традиционных схем газлифтных реакторов осуществляется на основании известного из практики опыта неэффективного использования энергии нисходящих потоков жидкости в ЗНП для обеспечения качественного воздействия на объекты обработки, и, таким образом, увеличения производительности этого процесса [19, 20].

С целью ликвидации указанных недостатков предлагаются конструктивные мероприятия по внесению в устройство реактора «пассивных» изменений структуры газожидкостных потоков (т.е. не требующих дополнительного расхода электроэнергии на функционирование элементов, способствующих интенсификации массообменных процессов).

Повышение интенсивности массообменных процессов в зоне нисходящего потока обеспечивается помимо открытого струйного потока дополнительными конструктивными изменениями.

В ЗНП (у днища аппарата) вносится дополнительный малорасходный барботер, производительность которого составляет около 15 % от общей газовой производительности (с учетом барботера, расположенного в зоне восходящего потока).

В конструкцию аппарата вносится «пассивный» элемент, представляющий собой горизонтальную перегородку со сквозными отверстиями, имеющими форму сопловых насадок для организации открытого струйного течения газожидкостной смеси в зоне нисходящего потока. Проход газа в ЗНП осуществляется за счет выполненных в горизонтальной перегородке клапанов. Предложенные изменения отражены на схеме реактора с открытым струйным течением (рис. 4).



**Рис. 4.** Принципиальная схема реактора с открытым струйным течением в зоне нисходящего потока:

1 – корпус; 2 – циркуляционная труба; 3 – барботер;  
4 – горизонтальная перегородка

**Fig. 4.** Schematic diagram of a reactor with an open jet stream in the downstream flow zone:

1 – housing; 2 – circulation pipe; 3 – bubbler;  
4 – horizontal septum

Лабораторные исследования, выполненные на установке, соответствующей схеме (см. рис. 4), показали увеличение уровня газонасыщения в зоне нисходящего потока около 15 % по сравнению с традиционными схемами, а также выравнивание уровня газожидкостной

смеси в зонах восходящего и нисходящего потоков с учетом газосодержания  $\varphi_r = 0,4$  в ЗНП.

При испытаниях определялась интенсивность изменения скорости сорбции кислорода раствором сульфата натрия в зависимости от геометрических параметров проточных отверстий  $F_c$  в горизонтальной перегородке и площади  $F_{\text{ЗНП}}$  сечения зоны нисходящего потока, а также в зависимости от уровня размещения горизонтальной перегородки в зоне нисходящего потока.

Полученные данные об изменении скорости сорбции кислорода приведены в табл. 1, 2, где количество строк – число измерений, а столбцы отражают конструктивные изменения в классической схеме.

Результаты эксперимента показаны на рис. 5, 6. Отсутствие перегородки в зоне нисходящего потока показывает среднее значение скорости сорбции кислорода близкое к рекомендуемому [21].

Приведенные измерения сорбции кислорода (табл. 1) соответствуют фиксированному положению горизонтальной перегородки в ЗНП по высоте ( $h_n / h_{\text{ст}} = 0,6$ ), в табл. 2 – постоянной площади сечения проточного отверстия в горизонтальной перегородке ( $F_c / F_{\text{ЗНП}} = 0,02$ ).

Последняя строка в таблицах информирует о проценте изменения величины скорости сорбции кислорода по сравнению с аппаратом, работающим по традиционной схеме (знак «+» соответствует увеличению скорости растворения кислорода, «-» – уменьшению).

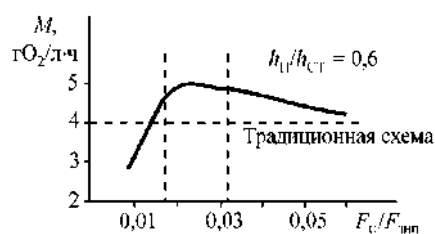
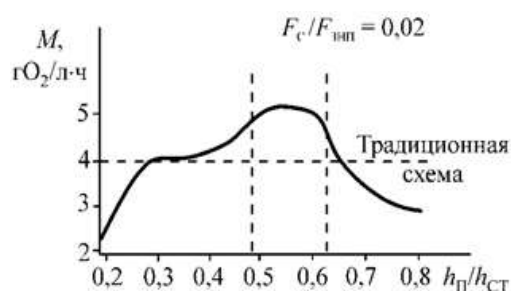
**Таблица 1.** Зависимость изменения скорости сорбции кислорода от диаметра проточного отверстия в горизонтальной перегородке в зоне нисходящего потока

**Table 1.** Dependence of the change in the rate of oxygen sorption on the diameter of the horizontal baffle flow hole in the downflow area

№ п/п	$F_c / F_{\text{ЗНП}}$						без перегородки в зоне нисходящего потока
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	
1	2,8	4,5	4,6	4,6	4,2	4,1	3,6
2	2,9	5,0	4,9	4,8	4,2	4,2	3,8
3	2,7	4,5	4,6	4,7	4,4	3,9	3,8
4	3,2	5,2	5,1	4,9	4,6	4,5	3,7
5	3,1	5,2	5,0	5,0	4,8	4,5	4,1
6	3,2	5,1	5,3	4,9	4,5	4,6	4,3
7	3,1	5,2	5,1	4,9	4,7	4,5	4,1
8	3,3	4,5	4,5	4,4	4,3	3,9	4,2
9	2,9	4,4	4,6	4,2	4,3	3,8	3,8
10	2,7	4,4	4,3	4,2	4,0	3,8	3,5
Среднее значение	3,0	4,8	4,8	4,6	4,4	4,2	3,9
$\Delta\%$	-23	+23	+23	+18	+13	+8	-

**Таблица 2.** Зависимость изменения скорости сорбции кислорода от уровня размещения горизонтальной перегородки в зоне нисходящего потока**Table 2.** The dependence of the change in the rate of oxygen sorption on the level of placement of the horizontal septum in downflow area

№ п/п	$h_n/h_{ст}$						
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
1	2,1	3,9	4,1	4,7	4,8	3,3	2,6
2	2,3	4,0	4,2	5,0	5,1	3,5	2,8
3	2,3	3,7	3,9	4,7	4,8	3,5	2,8
4	2,2	4,3	4,5	5,2	5,3	3,4	2,7
5	2,6	4,3	4,5	5,1	5,2	3,8	3,1
6	2,8	4,4	4,6	5,4	5,5	4,0	3,3
7	2,6	4,3	4,5	5,2	5,3	3,8	3,1
8	2,7	3,7	3,9	4,6	4,7	3,9	3,2
9	2,3	3,6	3,8	4,7	4,8	3,5	2,8
10	2,0	3,7	3,9	4,4	4,5	3,2	2,5
Среднее значение	2,4	4,0	4,2	4,9	5,0	3,6	2,9
$\Delta\%$	-38	+23	+6,9	+25	+27	-8,4	-27

**Рис. 5.** Изменение скорости сорбции кислорода в зависимости от диаметра проточного отверстия в горизонтальной перегородке в зоне нисходящего потока**Fig. 5.** Change in oxygen sorption rate depending on the diameter of the flow hole in the horizontal partition in the downflow zone**Рис. 6.** Изменение скорости сорбции кислорода в зависимости от уровня размещения горизонтальной перегородки в зоне нисходящего потока**Fig. 6.** Dependence of the change in oxygen sorption rate on the level of placement of the horizontal septum in the downflow zone

Для подтверждения обоснованности и эффективности предлагаемых конструктивных мероприятий проведен сравнительный аналитический расчет мощности, обусловленной

структурой течения жидкости в замкнутом циркуляционном контуре.

Кинетическая энергия и мощность потока на перемешивание для традиционных аппаратов (см. рис. 3, б) определяется по приведенной далее последовательности.

Объем газожидкостной смеси:

$$V_{г-ж} = \frac{V_{ж}}{1 - \varphi_{г}}$$

Для упрощения расчетов площади сечений зон восходящего и нисходящего потоков приняты равными  $F_{зВП} = F_{зНП} = F$ , тогда уровень газожидкостной смеси над барботером определяется как

$$H_{г-ж} = \frac{h}{1 - \varphi_{г}}$$

Плотность газожидкостной смеси:

$$\rho_{г-ж} = \rho_{ж} \cdot (1 - \varphi_{г}) + \rho_{г} \cdot \varphi_{г}$$

Объемный расход жидкости через сечение потока:

$$V_{ж.расх.} = V_{г-ж} - V_{зВП} = F \cdot (H_{г-ж} - h_{ст.}) = F \cdot \left( \frac{h}{1 - \varphi_{г}} - h_{ст.} \right)$$

Падение уровня монолита жидкости над барботером в зоне нисходящего потока при установившемся течении рабочей смеси в рабочем контуре аппарата:

$$\Delta h_{ж.зНП} = \frac{V_{ж.расх.}}{F} = \frac{h}{1 - \varphi_{г}} - h_{ст.}$$

Уровень верхней кромки вертикальной перегородки над монолитом жидкости при

установившемся течении рабочей смеси в рабочем контуре аппарата:

$$h_{\text{ст1}} = h_{\text{ст}} - h + \Delta h_{\text{ж.ЗНП}} = \frac{h \cdot \varphi_{\Gamma}}{1 - \varphi_{\Gamma}}.$$

Потенциальная энергия, накопленная жидкостью в ЗВП, трансформируется в кинетическую энергию ниспадающего, переливающегося через вертикальную перегородку потока жидкости, на поверхности монолита жидкости в зоне нисходящего потока:

$$\Pi = m_{\text{ж.расх}} \cdot g \cdot h_{\text{ст1}} = T.$$

Массовый расход жидкости:

$$m_{\text{ж.расх}} = V_{\text{ж.расх}} \cdot \rho_{\text{ж}}.$$

Кинетическая энергия рабочего потока жидкости:

$$T = F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot h \cdot \varphi_{\Gamma} \cdot \frac{h - h_{\text{ст}} \cdot (1 - \varphi_{\Gamma})}{(1 - \varphi_{\Gamma})^2}.$$

Мощность рабочего потока жидкости:

$$N = m_{\text{ж.расх}} \cdot W_{\text{с.п}} \cdot g.$$

Скорость струи без учета потерь, переливающейся через вертикальную перегородку:

$$W_{\text{с.п}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{\text{ст1}}}.$$

Тогда:

$$N = \sqrt{2} \cdot F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g^{3/2} \cdot h^{1/2} \cdot \varphi^{1/2} \cdot \frac{h - h_{\text{ст}} \cdot (1 - \varphi_{\Gamma})}{(1 - \varphi_{\Gamma})^{3/2}}.$$

Для значений  $h = 0,75h_{\text{ст}}$ ;  $\varphi_{\Gamma} = 0,3$ :

$$T = 0,023 \cdot F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot h_{\text{ст}}^2;$$

$$N = 0,0553 \cdot F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g^{3/2} \cdot h_{\text{ст}}^{3/2}.$$

Получены значения кинетической энергии и мощности для традиционного аппарата.

Аналитический расчет для аппарата, выполненного по схеме (см. рис. 4), выполняется при допущениях, принятых ранее при реализации традиционной схемы.

Кинетическая энергия жидкости без учета потерь, выходящей из проточного отверстия в горизонтальной перегородке 4, определяется количеством жидкости над этой перегородкой, т. е.:

$$\Pi = m_{\text{ж}} \cdot g \cdot (h_{\text{ст}} - h_n) = T.$$

Масса жидкости:

$$m_{\text{ж}} = F \cdot (h_{\text{ст}} - h_n) \cdot \rho_{\text{ж}}.$$

Кинетическая энергия рабочей жидкости:

$$T = (1 - K)^2 \cdot F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot h_{\text{ст}}^2$$

Мощность рабочей жидкости:

$$N = m_{\text{ж}} \cdot W_{\text{с}} \cdot g.$$

Скорость движения струи жидкости без учета потерь:

$$W_{\text{с}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{\text{ст}} - h_n)}.$$

Тогда мощность рабочей жидкости:

$$N = \sqrt{2} \cdot F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g^{3/2} \cdot (h_{\text{ст}} - h_n)^{3/2}$$

или

$$N = \sqrt{2} \cdot (1 - K)^{3/2} \cdot F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g^{3/2} \cdot h_{\text{ст}}^{3/2}.$$

Далее, задаваясь значениями различного относительного уровня размещения горизонтальной перегородки  $K$ , выполнен расчет сравнительных показателей увеличения кинетической энергии ниспадающего потока в ЗНП (строка 4) и его мощности (строка 5) на перемешивание (табл. 3).

## Заключение

Результаты сравнительных массообменных исследований позволили сформулировать рекомендации по выбору относительной площади проточного отверстия в горизонтальной перегородке  $F_c / F_{\text{ЗНП}} = 0,025$  и уровне ее размещения  $h_n / h_{\text{ст}} = 0,55$ . Газожидкостные реакторы с измененной структурой потоков газожидкостной смеси, выполненной путем введения в конструкцию дополнительных конструктивных элементов, позволили повысить производительность технологического процесса до 30 % по сравнению с традиционной схемой.

В связи с этим применение устройств для мойки и очистки деталей подвижного состава в подразделениях железных дорог, конструктивные особенности которых будут учитывать сформулированные рекомендации, позволят обеспечить повышение производительности технологических процессов при обеспечении энергоэффективности и безопасности производства.

## Список литературы

1. Гапанович В.А. Экологическая стратегия в действии // Локомотив. 2015. № 12 (708). С. 2–4.
2. Милованова Е.А., Милованов А.А., Милованов А.И. Поиск новых путей развития транспортной системы в зоне Восточного Зауралья России // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии : тр. 2-й Междунар. науч. конф. СПб., 2014. С. 113–125.
3. Simulation of the vibration of the carriage asymmetric parameters in mathcad / V.E. Gozbenko, S.K. Kargapoltsev, N.V. Minaev et al. // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11, № 23. P. 11132–11136.

4. Тимофеев В.С., Серафимов Л.А. Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза. М. : Высшая школа, 2003. 536 с.
5. Данквертс П.В. Газожидкостные реакции. М. : Химия, 1973. 296 с.
6. Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». СПб. : Химиздат, 2003. 608 с.
7. Потехин В.М., Потехин В.В. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки. СПб. : Химиздат, 2005. 912 с.
8. Кутепов А.М., Бондарева Т.И., Беренгартеп М.Г. Общая химическая технология. М. : Академкнига, 2003. 528 с.
9. Инженерная защита поверхностных вод от промышленных стоков / Д.А. Кривошеин, П.П. Кукин, В.Л. Лапин и др. // М. : Высшая школа, 2008. 344 с.
10. Халиуллин А.К., Салауров В.Н. Основы промышленной экологии. Иркутск : Оттиск, 2002. 268 с.
11. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. Л. : Машиностроение, 1976. 216 с.
12. Пат. 939060 СССР. Трубчатый реактор / С.Н. Булатов, В.А. Кернерман, А.А. Волошин и др. № 2957782/23-26 ; заявл. 26.06.1980 ; опубл. 30.06.1982, Бюл. № 24. 4 с.
13. Пат. 1214191 СССР. Химический реактор / А.В. Шишкин, И.И. Барбаш, А.А. Мамедов. № 3815553/23-26 ; заявл. 16.07.1984 ; опубл. 28.02.1986, Бюл. № 8. 3 с.
14. Моющие средства / С.К. Каргапольцев, А.Н. Волков, А.И. Милованов и др. // Деп. в ДЦНТИ ВСЖД 14.11.2003, № 629.488.2. 18 с.
15. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М. : Химия, 1973. 752 с.
16. Пат. 766629 СССР. Газлифтный аппарат / Ю.В. Ердяков, С.Б. Ермаков, Н.Г. Павлов и др. № 2686917/23-26 ; заявл. 22.11.1978 ; опубл. 30.09.1980, Бюл. № 36. 3 с.
17. Пат. 1525930 Великобритания. Циркулятор газожидкостных смесей / ICI LTD ; заявл. 4.12.74 ; опубл. 27.09.1978.
18. Пат. 3630848 США. Способ и устройство для непрерывной ферментации / Л. Лефранко. № 786,930 ; заявл. 26.12.68 ; опубл. 28.12.1971.
19. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. М. : Химия, 1990. 206 с.
20. Виестур У.Э., Кузнецов А.М., Савенков В.В. Системы ферментации. Рига : Зинатне, 1988. 368 с.
21. Методика определения сульфитного числа с помощью датчика растворенного кислорода. М. : ВНИИЭНЕРГЕТИКА, 1976.

### References

1. Gapanovich V.A. Ekologicheskaya strategiya v deistvii [Environmental strategy in action]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2015, no. 12 (708), pp. 2–4.
2. Milovanova E.A., Milovanov A.A., Milovanov A.I. Poisk novykh putei razvitiya transportnoi sistemi v zone Vostochnogo Zauralya Rossii [Search for new ways to develop the transport system in the zone of the Eastern Trans-Urals of Russia]. *Trudy 2-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Magnitolevitatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii»* [Proceedings of the 2nd International Scientific Conference «Magnetolevitation Transport Systems and Technologies »]. Saint Petersburg, 2014, pp. 113–125.
3. Gozbenko V.E., Kargapol'tsev S.K., Minaev N.V., Karlina A.I. Simulation of the vibration of the carriage asymmetric parameters in mathcad. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 23, pp. 11132–11136.
4. Timofeev V.S., Serafimov L.A. Printsipy tekhnologii osnovnogo organicheskogo i neftehimicheskogo sinteza [Principles of basic organic and petrochemical synthesis technology]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2003. 536 p.
5. Dankvert's P.V. Gazozhidkostnye reaktsii [Gas-liquid reactions]. Moscow: Khimiya Publ., 1973. 296 p.
6. Frolov V.F. Lektsii po kursu «Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii» [Lectures on the course «Processes and devices of chemical technology»]. Saint Petersburg: Khimizdat Publ., 2003. 608 p.
7. Potekhin V.M., Potekhin V.V. Osnovy teorii khimicheskikh protsessov tekhnologii organicheskikh veshchestv i neftepererabotki [Fundamentals of the theory of chemical processes technology of organic substances and oil refining]. Saint Petersburg: Khimizdat Publ., 2005. 912 p.
8. Kutepov A.M., Bondareva T.I., Berengartep M.G. Obshchaya khimicheskaya tekhnologiya [General chemical technology]. Moscow: Akademkniga Publ., 2003. 528 p.
9. Krivoshein D.A., Kukin P.P., Lapin V.L., Ponomarev N.L., Serdyuk N.I., Fetisov A.G. Inzhenernaya zashchita poverkhnostnykh vod ot promyshlennykh stokov [Engineering protection of surface waters from industrial effluents]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 2008. 344 p.
10. Haliullin A.K., Salaur'ov V.N. Osnovy promishlennoi ekologii [Resistance of materials]. Irkutsk: Ottisk Publ., 2002. 268 p.
11. Sokolov V.N., Domanskii I.V. Gazozhidkostnye reaktory [Gas-liquid reactors]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1976. 216 p.
12. Bulatov S.N., Kernerman V.A., Voloshin A.A., Gusev-Donskoi A.P. Copyright certificate SU 939060 A1, 30.06.1982.
13. Shishkin A.V., Barabash I.I., Mamedov A.A. Copyright certificate SU 1214191 A, 28.02.1986.
14. Kargapol'tsev S.K., Volkov A.N., Milovanov A.I., Milovanova E.A. Moyuscchie sredstva [Detergents]. *Deponirovannaya rukopis'* [Deposited manuscript], no 629.488.2, dated November 14, 2003, 18 p.
15. Kasatkin A.G. Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii. [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow: Khimiya Publ., 1973. 752 p.
16. Erdyakov Yu.V., Ermakov S.B., Pavlov N.G., Kalas A.E., Malenko Yu.I., Fraishtadt V.Ya., Kotov V.A., Kukartsev E.M., Basov B.K. Copyright certificate SU 766629, 30.09.1980.
17. ICI LTD. Patent GB1525930A, 27.09.1978.
18. Louis Alfred Auguste Lefrancois. Patent US3630848A, 28.12.1971.

19. Kardashev G.A. Fizicheskie metody intensivatsii processov himicheskoi tehnologii [Physical methods of intensification of chemical technology processes]. Moscow: Khimiya Publ., 1990. 206 p

20. Viestur U.E., Kuznetsov A.M., Savenkov V.V. Sistemy fermentatsii. [Fermentation systems]. Riga: Zinatne Publ., 1988. 368 p.

21. Metodika opredeleniya sul'fitnogo chisla s pomoshchyu datchika rastvorenno kislороda [Method for determining the sulfite number using a dissolved oxygen sensor]. Moscow: VNIENERGETIKA Publ., 1976.

#### **Информация об авторах**

*Милованова Евгения Алексеевна*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: evakami@yandex.ru.

*Гозбенко Валерий Ерофеевич*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: vgozbenko@yandex.ru.

#### **Information about the authors**

*Evgeniya A. Milovanova*, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Electric rolling stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: evakami@yandex.ru.

*Valerii E. Gozbenko*, Doctor of Engineering Science, the Full Professor, Professor of Department of Math, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: vgozbenko@yandex.ru.



## Применение программного комплекса Frost 3D Universal для проведения прогнозных теплотехнических расчетов земляного полотна

Д.А. Ковенькин✉, Д.Н. Насников, И.С. Чернецкая

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

✉kovenkin\_da@irgups.ru

### Резюме

В ходе исследования был проведен теплотехнический расчет трех вариантов проектных решений по стабилизации деформаций земляного полотна, расположенного на протаивающих основаниях из многолетнемерзлых грунтов на участках Байкало-Амурской магистрали. Расчет проводился с применением программного комплекса Frost 3D Universal. Проведено сравнение расчетных температур с фактическими температурами, зафиксированными в первый год эксплуатации. Данные фактических температур представлены по результатам наблюдений Новочарской дистанции пути. Расчеты показали достаточно хорошую сходимость с данными наблюдений, при этом имеется разница 0,1–0,5 °С в сторону более низких температур. В связи с этим можно сделать вывод, что программный комплекс Frost 3D Universal может с достаточно высокой эффективностью использоваться для проведения прогнозных теплотехнических расчетов земляного полотна. Изучены проблемы и способы стабилизации деформаций земляного полотна на протаивающих основаниях из многолетнемерзлых грунтов, разработаны проектные решения по стабилизации таких деформаций. В проекте рассмотрены три основных варианта, которые применяются на Байкало-Амурской магистрали: скальная наброска, сезоннодействующие охлаждающие установки и солнцезащитный навес. Применение этих проектных решений будет способствовать сохранению и восстановлению мерзлого состояния грунтов в основании земляного полотна. Общий вывод по данной работе можно сделать следующий: каждая конструкция применима в условиях вечной мерзлоты на участках Байкало-Амурской магистрали.

### Ключевые слова

теплотехнический расчет, программный комплекс Frost 3D Universal, стабилизация, земляное полотно, вечная мерзлота, проектные решения

### Для цитирования

Ковенькин Д.А. Применение программного комплекса Frost 3D Universal для проведения прогнозных теплотехнических расчетов земляного полотна / Д.А. Ковенькин, Д.Н. Насников, И.С. Чернецкая // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 80–90. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).80-90.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 25.07.2022 г.; поступила после рецензирования: 26.09.2022 г.; принята к публикации: 27.09.2022 г.

## Application of the Frost 3D Universal software package for predictive thermal calculations of the roadbed

D.A. Kovenkin✉, D.N. Nasnikov, I.S. Chernetskaya

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉kovenkin\_da@irgups.ru

### Abstract

In the course of this work, a thermal engineering calculation was carried out of three variants of design solutions for stabilizing the deformations of the roadbed located on thawing foundations of permafrost soils on sections of the Baikal-Amur mainline. The calculation was carried out using the Frost 3D Universal software package. The calculated temperatures are compared with the actual temperatures in the 1st year of operation. The data of actual temperatures are presented based on the results of observations of the Novocharsky distance of the path. The calculations showed a fairly good convergence with the observational data, with a difference of 0,1–0,5 °C towards lower temperatures. In this regard, it can be concluded that the use of the Frost 3D Universal software package for predictive thermal calculations of the roadbed can be used with sufficiently high efficiency. The problems and methods of stabilizing the deformations of the roadbed on thawing bases of permafrost soils have been studied. Constructive solutions have been developed to stabilize the deformations of the roadway on thawing bases from permafrost soils. The project considers the main three options that are used on the Baikal-Amur mainline: a rock outline, seasonal cooling units and a sunshade canopy. The application of these design solutions will contribute to the preservation and restoration of the frozen state of the soil at the base of the roadbed. The general conclusion from this work can be made as follows: each design is applicable in permafrost conditions on sections of the Baikal-Amur mainline.

**Keywords**

thermal engineering calculation, software package Frost 3D, stabilization, roadbed, permafrost, design solutions

**For citation**

Koven'kin D.A., Nasnikov D.N., Chernetskaya I.S. Primenenie programmno kompleksa Frost 3D dlya provedeniya teplotekhnicheskikh raschetov zemlyanogo polotna [Application of the Frost 3D Universal software package for predictive thermal calculations of the roadbed]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 80–90. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).80-90.

**Article info**

Received: July 25, 2022; Revised: September 26, 2022; Accepted: September 27, 2022.

**Введение**

Существенная часть железнодорожного пути Восточного полигона расположена в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Железные дороги в этой зоне характеризуются самой повышенной деформативностью земляного полотна в сравнении с остальной сетью.

Актуальность проблемы обусловлена тем, что на значительном протяжении (более 1 000 км) существующих железных дорог Забайкалья, Байкало-Амурской магистрали, расположенных на высокотемпературных вечномерзлых грунтах, проявляются часто неравномерные и недопустимые искажения продольного профиля и плана линии, негативно влияющие на безопасность и бесперебойность движения поездов [1–11].

При проектировании различных конструкций и сооружений в условиях распространения ММГ проведение теплотехнических расчетов является обязательным условием. Из всех грунтов оснований ММГ наиболее чувствительны к изменению температурного режима и предрасположены к таким опасным процессам, как термокарст, морозное пучение, термоденудация (солюфикация, термоэрозия) и наледеобразование.

Использованию результатов инженерных изысканий при теплотехнических расчетах ММГ способствует программное обеспечение, которое позволяет учитывать метеоданные и литологию, теплофизические и гидрогеологические свойства грунта, строить графики содержания незамерзшей воды (как функции температуры). Примером такого программного обеспечения является программный комплекс Frost 3D Universal, разработанный ООО «Симмэйкер».

**Назначение программного комплекса Frost 3D**

Одной из основных задач при проектировании сооружений является обоснованное

определение принципа использования многолетнемерзлых грунтов. Возможно как сохранение мерзлого состояния грунтов (I принцип), так и использование оснований в талом состоянии (II принцип) [12]. Выбор принципа осуществляется по результатам геокриологического прогноза – теплотехнического прогноза, учитывающего множество факторов, таких как строение грунта, температура каждого инженерно-геологического элемента до начала строительства, метеорологические условия, тепловое воздействие от сооружений в период эксплуатации. При проведении таких прогнозных расчетов в условиях вечной мерзлоты одной из важных задач является определение трехмерного теплового состояния грунтов в процессе эксплуатации сооружения, так как от того, будут ли грунты находиться в мерзлом или талом состоянии, зависит устойчивость и надежность сооружения.

Frost 3D – программный комплекс для моделирования процессов тепломассопереноса в многолетнемерзлых грунтах с учетом влияния внешних тепловых воздействий. Он позволяет получать научно-обоснованные прогнозы тепловых режимов ММГ в условиях теплового влияния трубопроводов, добывающих скважин, зданий, гидротехнических и других сооружений с учетом термостабилизации грунта.

**Математическая модель**

Расчет нестационарной задачи распространения тепла в трехмерном пространстве [13] в программе Frost 3D основан на широко апробированном уравнении теплопроводности (1), в котором учтены фазовые превращения и перенос тепла за счет конвекции:

$$\left( C(T) + \rho_b L \frac{\partial w_w(T)}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} +$$
(1)

$$+ \nabla(-\lambda(T)\nabla T) + C_w u \nabla T = 0,$$

где  $T$  – температура, °C;  $C(T)$  – зависимость

объемной теплоемкости грунта от температуры, Дж/(м<sup>3</sup>·°C);  $w_w(T)$  – зависимость количества незамерзшей воды в грунте от температуры, д. е.;  $\rho_b$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $L$  – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг;  $t$  – время, с;  $\lambda(T)$  – зависимость теплопроводности грунта от температуры, Вт/(м·°C);  $C_w$  – объемная теплоемкость воды, Дж/(м<sup>3</sup>·°C);  $u$  – вектор скорости фильтрации грунтовых вод, м/с;  $\nabla T$  – градиент температуры, °C.

Для всех имеющихся в моделируемой области материалов и сезоннодействующих охлаждающих устройств необходимо задать соответствующие физические свойства. Также для всех используемых в модели условий теплообмена необходимо определить параметры граничных условий. В программном комплексе доступно задание следующих граничных условий:

1. Граничное условие первого рода (2) – задается зависимость температуры от времени:

$$T = T_{ext}(t). \quad (2)$$

2. Граничное условие второго рода (3), где необходимо задать зависимость теплового потока от времени:

$$n(\lambda \nabla T) = q_0(t). \quad (3)$$

3. Граничное условие третьего рода (теплообмен по Ньютону) (4), где необходимо задать зависимость температуры, коэффициента теплообмена, а также при необходимости дополнительного теплового потока от времени:

$$n(\lambda \nabla T) = \alpha(t)(T_{ext}(t) - T) + q_0(t), \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $T_{ext}$  – температура внешней среды, °C;  $T$  – температура грунта, °C;  $q_0$  – тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $t$  – время, с.

4. Граничное условие четвертого рода с учетом теплообмена излучением (теплообмен по Стефану – Больцману) (5), где по сравнению с граничным условием третьего рода есть возможность учесть влияние теплообмена путем теплового излучения на основании закона Стефана – Больцмана:

$$n(\lambda \nabla T) = \varepsilon \sigma (273,15 + T_{amb}(t))^4 - (273,15 + T_{amb})^4 + \alpha(t) \cdot (T_{ext}(t) - T) + q_0(t). \quad (5)$$

где  $T_{amb}$  – температура источника теплового излучения, °C;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана, равная  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности.

Моделирование фильтрации грунтовых вод в программе Frost 3D основано на широко апробированном уравнении фильтрации грунто-

вых вод (6), выведенном из закона Дарси [14]:

$$\nabla(-K \nabla H) = 0, \quad (6)$$

откуда вектор скорости фильтрации воды в грунте вычисляется по формуле (7):

$$u = -K \nabla H, \quad (7)$$

где  $H$  – гидравлический напор, м;  $K$  – коэффициент фильтрации, м/с;  $u$  – вектор скорости фильтрации воды;  $\nabla H$  – градиент гидравлического напора, м.

В качестве гидрологического граничного условия доступно следующее: величина гидравлического напора, которая вычисляется по формуле (8):

$$H = H_{ext}(t), \quad (8)$$

где  $H_{ext}$  – скорость втекающего потока, м/с.

Решение уравнения теплопроводности в трехмерной постановке осуществляется численно с помощью явного метода конечных разностей [15]. Конечно-разностный метод является сеточным методом, т. е. расчетная область дискретизируется прямоугольной сеткой, а решение происходит непосредственно в узлах сетки. Для каждого узла сетки составляется разностное уравнение в соответствии с используемым шаблоном разностной схемы. Получается система линейных уравнений, решение которой позволяет получить необходимый результат в рассматриваемой расчетной области.

### Проектные решения для проведения теплотехнического расчета

Для проведения теплотехнического расчета были разработаны проектные решения основных мероприятий по стабилизации деформаций земляного полотна, расположенного на протаивающих основаниях из многолетнемерзлых грунтов на участках Байкало-Амурской магистрали. К таковым можно отнести скальную охлаждающую наброску, сезоннодействующие охлаждающие устройства и солнцезащитный навес. Участок проектирования расположен на 1 841 км перегона Олонгдо – Хани Восточно-Сибирской железной дороги. Основным фактором, определяющим режим подземных вод данной территории, является многолетняя мерзлота, имеющая повсеместное распространение. Существенным источником питания служат атмосферные осадки, а в меньшей степени – оттаивающие верхние слои мерзлоты.

Насыпь проектировалась высотой 5 м. Откос насыпи с уклоном 1:1,5. Многолетне-

мерзлые грунты представлены в виде галечникового грунта с песчаным заполнителем, песка и суглинка.

Скальная наброска проектировалась в виде каменной наброски на откосах из скального грунта фракцией от 200 до 500 мм с предварительным рыхлением откоса (ширина 2 м). Для повышения надежности работы устраиваются местные возвышения (туры), которые обеспечивают проникновения холодного воздуха в поры камня (рис. 1).

Сезоннодействующие охлаждающие конструкции сооружаются с применением тепловых труб, заполненных хладагентом. Установка представляет собой трубу диаметром 50 мм с

заглушенным нижним торцом и крышкой в верхней части, имеющей запорно-зарядную арматуру. Запорно-зарядная арматура предназначена для пневматических испытаний установки на герметичность, ее вакуумирование, зарядки хладагентом, а также манометрического контроля в процессе эксплуатации. Выполняется в виде вентилей, располагаемых на конденсаторе в месте, удобном для зарядки и проверки. Диаметр вентилей должен составлять 6–10 мм. Длина установок принималась исходя из того, чтобы они были заглублены в мерзлые грунты на глубину 2 м. Установки располагались в плане в шахматном порядке с расстоянием между рядами 2 м (рис. 2).

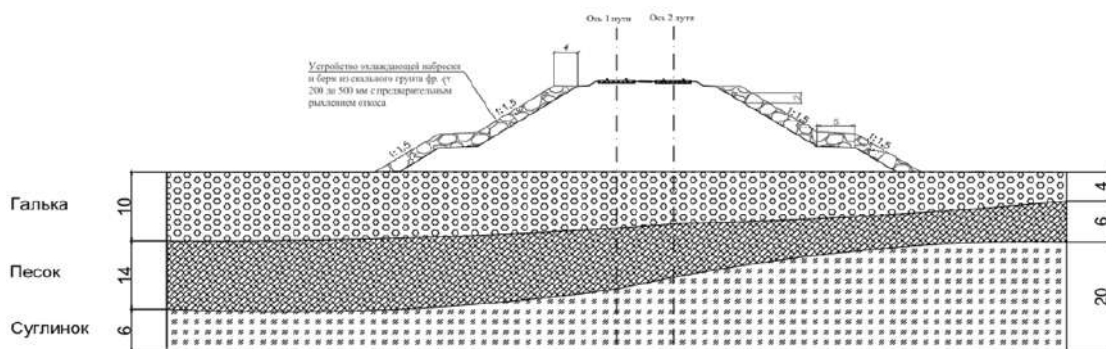


Рис. 1. Проект скальной наброски

Fig. 1. The project of strengthening the slope with a stone

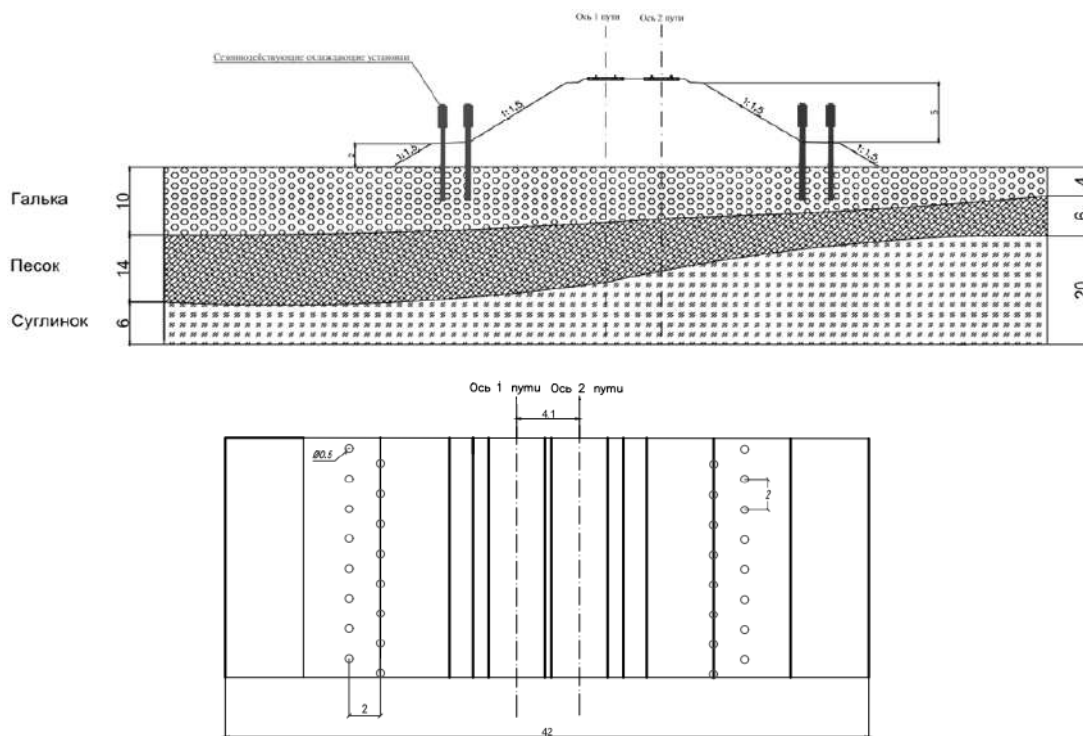


Рис. 2. Проект сезоннодействующих охлаждающих установок

Fig. 2. The project of seasonal cooling units

Солнцезащитный навес устраивается таким образом, чтобы под снежным покровом у поверхности откоса насыпи создавалась воздушная полость, в которую имелся бы доступ для холодного наружного воздуха. Навес состоит из следующих конструктивных элементов: кровля навеса; продольные уголки, располагаемые на кровле навеса; обрешетка, к которой крепится кровля навеса; уголок поперечный, для крепления к нему обрешетки; продольные балки, для крепления к ним поперечных уголков; стойки, опорные части навеса; подставки под стойки; защитные теплоизоляционные экраны, устанавливаемые в верхней и нижней части навеса, а также с его торцевых сторон.

Высота полости применяется в проекте 3 м, ширина равна 5 м. Вентиляционные стояки устраиваются периодически по длине покрытия

вдоль пути с шагом не более 10 м. Для усиления защиты от нагрева в летнее время в верхней части полости размещается слой теплоизоляции из профнастила (рис. 3).

Многолетние средние значения температур воздуха и высоты снежного покрова взяты по новым климатическим нормам (данные геофизической станции г. Иркутска за период 1971–2000 гг.):  $T_{\text{воздуха ср. год.}} = -7,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $h_{\text{снега}} = 0,22 \text{ м}$  при плотности  $0,17 \text{ г/см}^3$ . В табл. 1 представлены природно-климатические условия метеостанции Чара, в табл. 2 – теплофизические свойства грунтов.

Прогноз эффективности действия – 5 лет.

### Результаты расчета

Результаты теплотехнических расчетов с применением программного комплекса Frost 3D представлены в виде изоповерхностей тем-

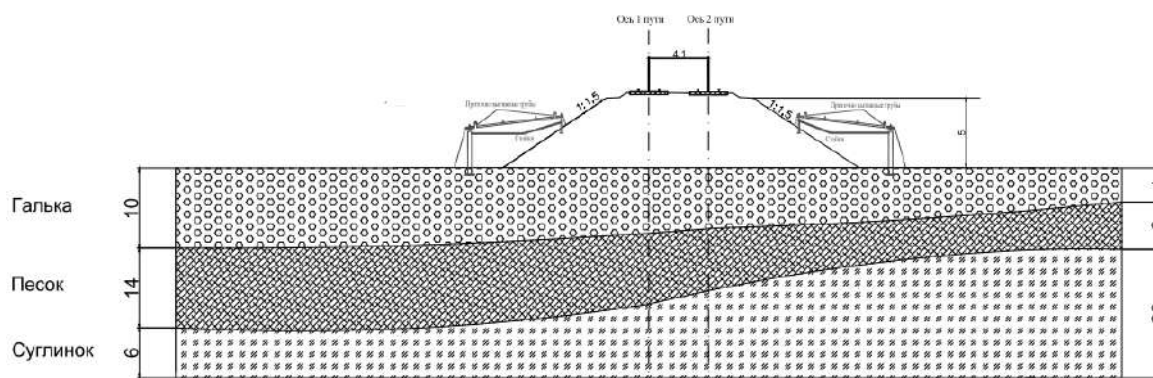


Рис. 3. Проект солнцезащитного навеса

Fig. 3. The project of a sunshade canopy

Таблица 1. Природно-климатические условия метеостанции Чара

Table 1. Natural and climatic conditions of the Chara weather station

Номер месяца	Температура воздуха, $^\circ\text{C}$	Суммарная солнечная радиация, $\text{ккал/см}^2 \text{ мес.}$	Скорость ветра, м/с	Высота снежного покрова, м	Плотность снежного покрова, $\text{г/см}^3$
1	-33,0	1,5	0,6	0,12	0,16
2	-28,0	3,3	0,7	0,13	0,16
3	-18,0	7,8	1,5	0,11	0,17
4	-4,4	10,2	2,5	0,03	0,21
5	5,1	11,3	2,7	–	–
6	12,0	13,8	1,8	–	–
7	1,0	12,9	1,3	–	–
8	13,1	11,2	1,3	–	–
9	5,1	6,8	1,4	–	–
10	-6,3	4,4	1,2	0,05	0,15
11	-20,8	1,9	0,9	0,08	0,15
12	-30,1	1,1	0,6	0,10	0,15
Среднее значение	-7,4	7,2	1,4	0,09	0,16

**Таблица 2.** Теплофизические свойства грунтов  
**Table 2.** Thermophysical properties of soils

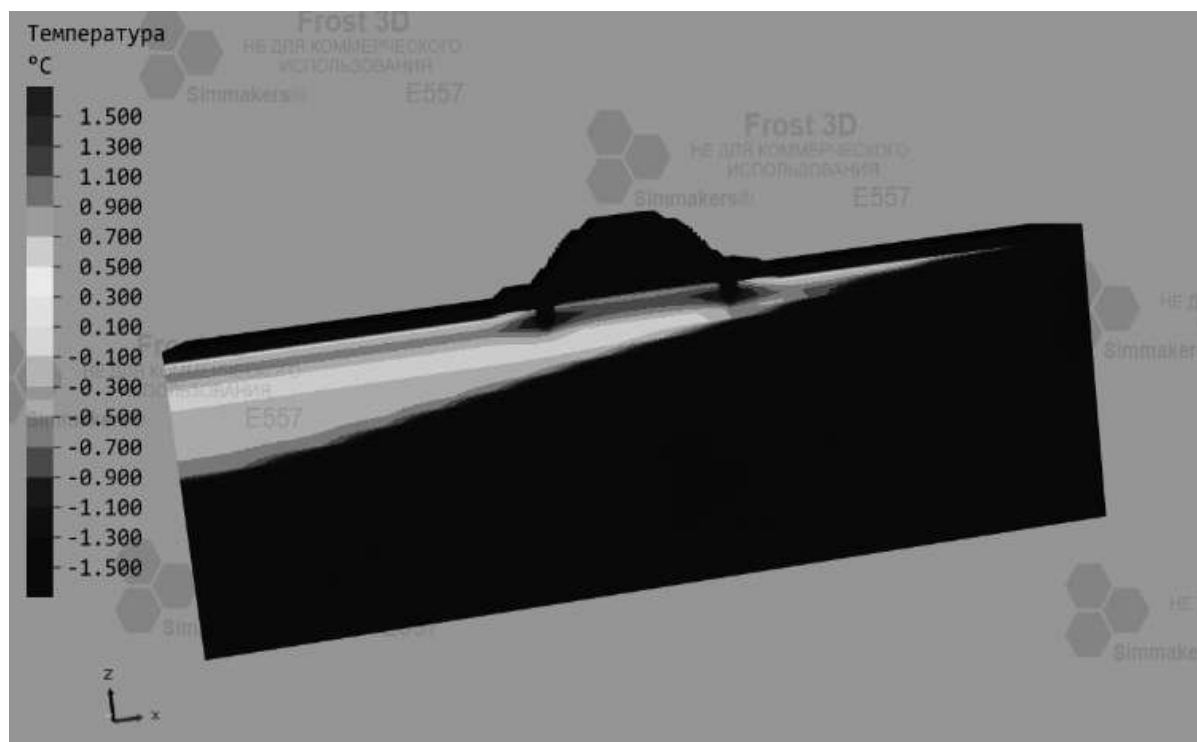
Параметр	Материал			Место нахождения	
	Щебенисто-галечниковый грунт с песчаным заполнителем	Песок	Суглинок	Основание насыпи	Верх насыпи
Объемная теплоемкость талого грунта, МДж/м <sup>3</sup> ·°С	3,11	3,13	3,15	2,61	2,35
Объемная теплоемкость мерзлого грунта, МДж/м <sup>3</sup> ·°С	2,12	2,14	2,35	2,42	2,18
Теплопроводность талого грунта, Вт/(м·°С)	1,49	1,57	1,51	2,09	1,45
Теплопроводность мерзлого грунта, Вт/(м·°С)	1,57	1,79	1,68	2,15	1,51
Суммарная весовая влажность грунта, д.е.	0,10	0,38	0,25	0,03	0,05
Плотность сухого грунта, кг/м <sup>3</sup>	2000	1220	1600	2060	1900
Температура фазового перехода, °С	-0,16	-0,28	-0,2	0	0

пературного распределения по всему поперечному сечению земляного полотна. На рис. 4 показано такое распределение на примере сезоннодействующих охлаждающих установок.

В данном случае расчеты показали, что сезоннодействующие охлаждающие установки действуют локально в местах их расположения.

Минимальная температура на глубине 1,5 м в первый год эксплуатации в местах установок равна  $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 5).

Расчет с применением скальной наброски показал ее действие практически сразу с момента обустройства. Промерзание грунта происходит под основанием насыпи по всей его



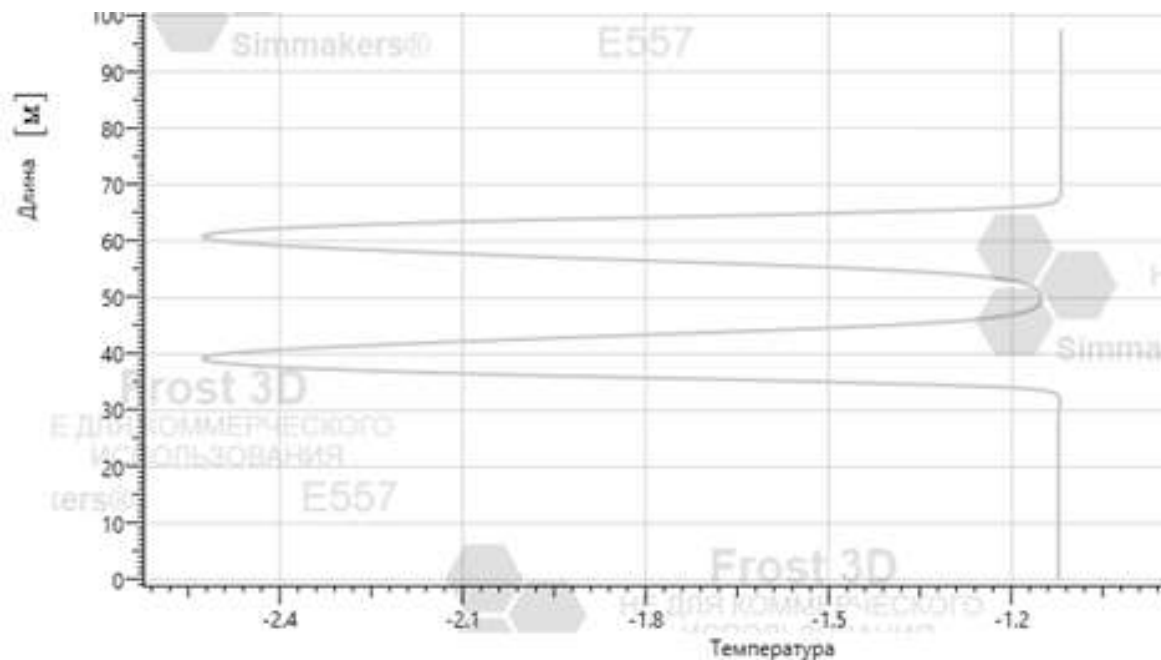
**Рис. 4.** Распределение температуры в теле и основании земляного полотна с применением сезоннодействующих охлаждающих установок

**Fig. 4.** Temperature distribution in the roadbed with the use of seasonal cooling units

ширине. Температура под скальной наброской на глубине 1,5 м в первый год эксплуатации равна  $-1,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 6).

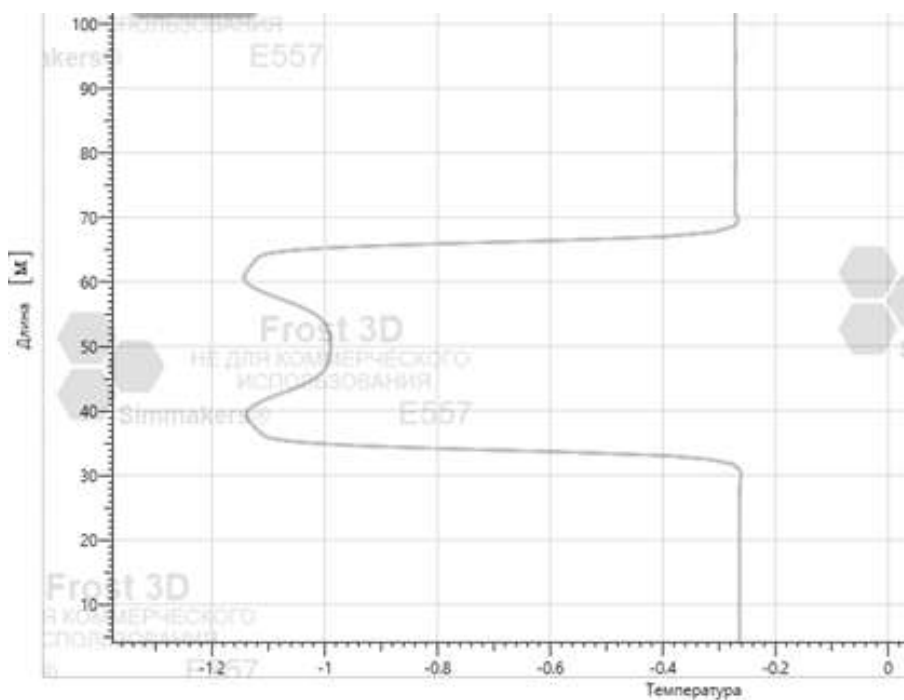
Расчет с применением солнцезащитных навесов показал их действие сразу по-

сле сооружения. Промерзание грунта происходит под навесами и основанием насыпи по всей его ширине. Температура под навесами на глубине 1,5 м в первый год эксплуатации равна  $-1,26\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 7).



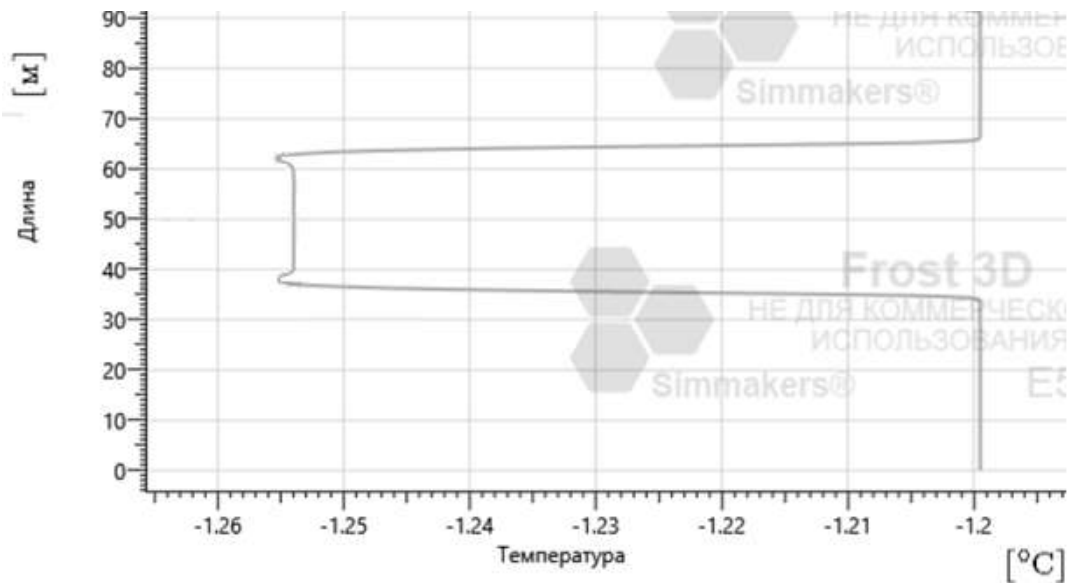
**Рис. 5.** Расчетная температура грунтов при применении сезоннодействующих охлаждающих установок в первый год эксплуатации

**Fig. 5.** Estimated soil temperature when using seasonally active cooling units in the first year of operation



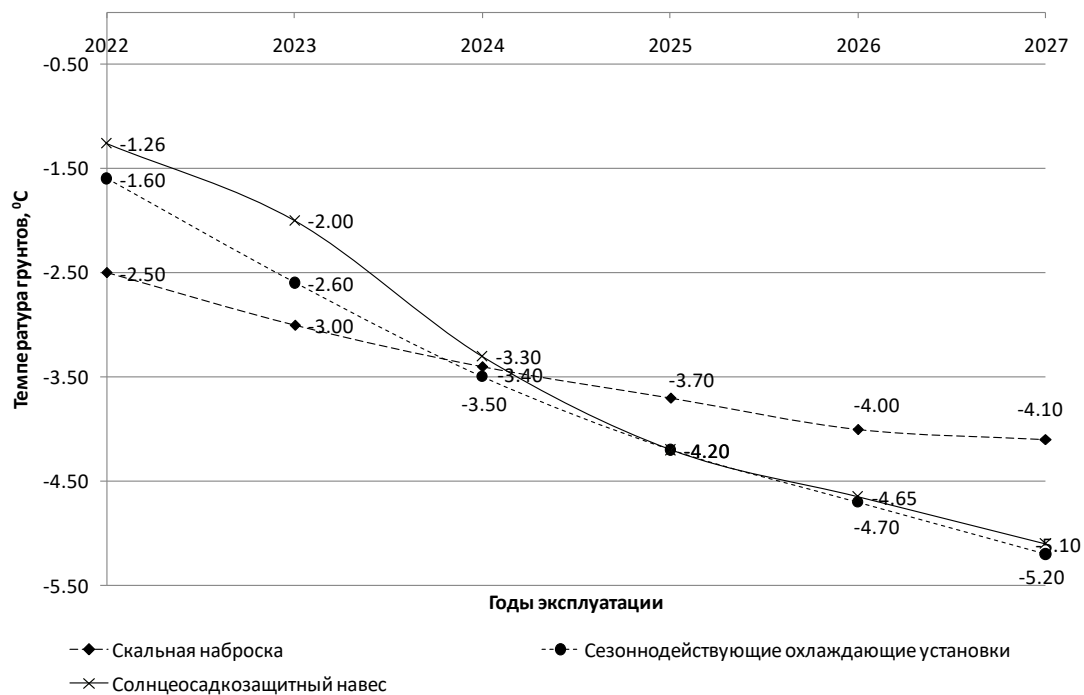
**Рис. 6.** Расчетная температура грунтов при применении скальной наброски в первый год эксплуатации

**Fig. 6.** The estimated temperature of soils when using stone protection in the first year of operation



**Рис. 7.** Расчетная температура грунтов при применении солнцесадкозащитных навесов в первый год эксплуатации

**Fig. 7.** The estimated temperature of soils when using sunshade canopies in the first year of operation



**Рис. 8.** Интенсивность промерзания грунтов с прогнозом на пять лет

**Fig. 8.** The intensity of soil freezing with a forecast for five years

По результатам теплотехнических расчетов был составлен обобщенный график интенсивности промерзания грунтов для всех трех проектных сооружений на пять лет эксплуатации (рис. 8).

Все проектные решения обеспечивают повышение и стабилизацию кровли многолетнемерзлых пород. Применение этих способов будет

способствовать сохранению и восстановлению мерзлого состояния грунтов в основании земляного полотна. Все три сооружения не дают растепления грунтов основания. С каждым годом эксплуатации грунт под основанием земляного полотна промерзает в среднем с интенсивностью от 0,82 до -1,04 °C в год.



В дальнейшем было проведено сравнение расчетных температур с фактическими температурами, зафиксированными в первый год эксплуатации. Данные фактических температур представлены по результатам наблюдений Новочарской дистанции пути [16–18]. Расчеты показали достаточно хорошую сходимость с данными наблюдений, при этом отмечалась разница 0,1–0,5 °С в сторону более низких температур (рис. 9).

В связи с этим можно сделать вывод, что программный комплекс Frost 3D Universal может быть использован для проведения теплотехнических расчетов земляного полотна. Расчеты имеют достаточно высокую точность при условии соблюдения достоверности всех исходных данных.

### Заключение

Общий вывод по данной работе можно сделать следующий: каждая конструкция применима в условиях вечной мерзлоты на участках Байкало-Амурской магистрали.

Скальная наброска одна из самых эффективных, бюджетных и долговечных охлаждающих конструкций. Зимой холодный воздух через снег, размыты в камнях и «продухи» сво-

бодно проникает к земляному полотну через воздушные поры, таким образом, в разы снижается отепляющее воздействие снежного покрова. Летом работает как затеняющий навес, нагреваются только верхний слой конструкции, за счет точечного контакта между собой и свободной конвекции воздуха тепло не проникает в глубину. Для ее эффективной работы следует применять породы крупных фракций. В ходе эксплуатации необходимо предотвращать загрязнение скальной наброски. Избыточное содержание мелочи приводит к снижению водопроницаемости и сдвиговой прочности этой конструкции.

Сезоннодействующие охлаждающие конструкции работают только с небольшой высотой снежного покрова и имеют ограниченный радиус теплового влияния, поэтому эффективны только большими, тесными группами. Функционируют только в зимнее время за счет выноса тепла посредством конвекции теплоносителя, либо за счет цикла испарения-конденсации. Могут устанавливаться в выемках, где нельзя установить солнцезащитный навес.

Для солнцезащитного навеса расчетная толщина снежного покрова не является

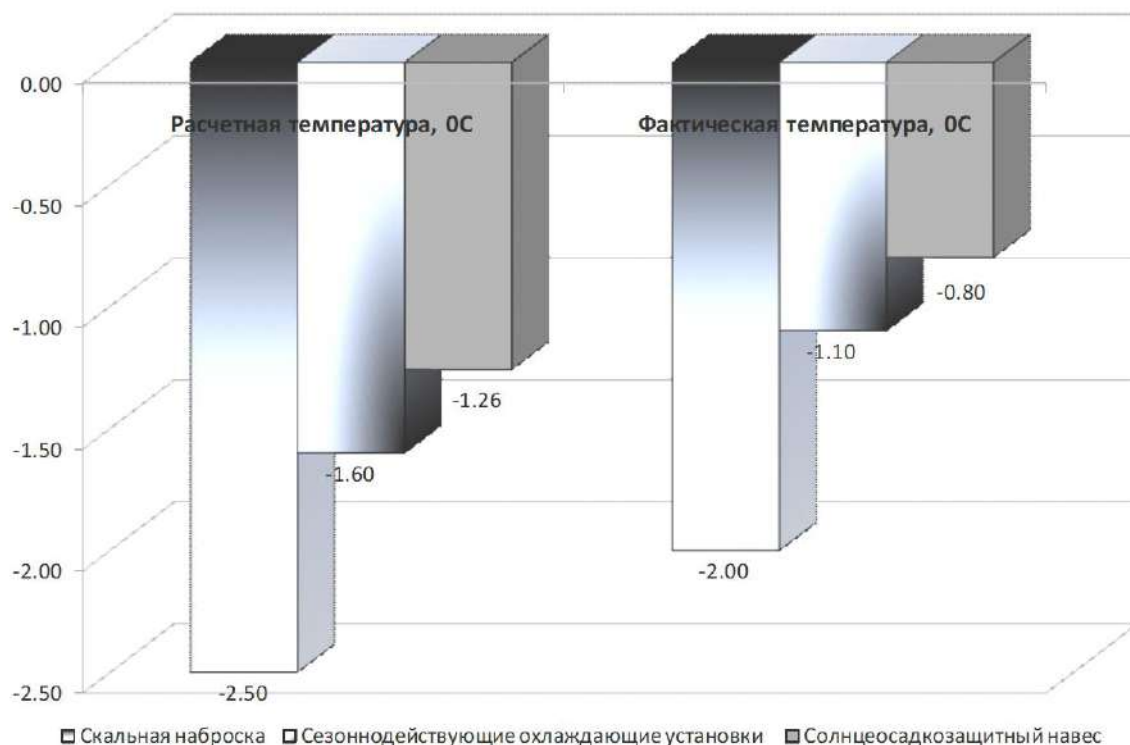


Рис. 9. Сравнение расчетных и фактических температур в первый год эксплуатации

Fig. 9. Comparison of calculated and actual temperatures in the first year of operation

ограничивающим фактором для применения. Работают круглогодично. Летом защищают откосы от солнечной радиации, зимой пропускают холодный воздух. Солнцезащитный

навес является эффективным и экономически обоснованным решением в текущем содержании земляного полотна для устранения локальных тепловых деформаций.

### Список литературы

1. Кондратьев В.Г. Активные способы укрепления основания земляного полотна на вечномёрзлых грунтах. Чита : Забтранс, 2001. 100 с.
2. Кондратьев В.Г. Стабилизация земляного полотна на вечномёрзлых грунтах. Чита : Полиграф-Ресурс, 2011. 176 с.
3. Пат. 1740555 СССР. Железнодорожный путь на сильнольдистых вечномёрзлых грунтах / В.Г. Кондратьев, А.А. Королев, М.И. Карлинский и др. № 4812664/03 ; заявл. 17.01.1990 ; опубл. 15.06.1992, Бюл. № 22. 4 с.
4. Ковенькин Д.А., Валиев Н.А. Защита от деградации многолетнемерзлых грунтов на снегозаносимых участках // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 11. С. 23–26.
5. Защита водопропускной трубы на железной дороге от воздействия наледи / В.А. Подвербный, Д.А. Ковенькин, Е.В. Филатов и др. // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 136–146.
6. Принятие решений при выборе конструкций и параметров сезонных охлаждающих устройств / В.А. Подвербный, А.А. Перельгина, Л.Ю. Гагарин и др. // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2019. С. 147–160.
7. Перспективы транспортного, промышленного, гражданского строительства в Тайшетском районе Иркутской области и предотвращение деградации многолетнемерзлых грунтов / В.А. Подвербный, Д.А. Ковенькин, Е.В. Филатов и др. // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2019. С. 129–147.
8. Работа пути в условиях тяжеловесного движения / В.О. Певзнер, И.Б. Петропавловская, О.А. Сулов и др. // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф., чтения, посвящ. памяти профессора Г.М. Шахуняца. 2016. М., 2017. С. 138–140.
9. Кирпичников К.А., Дашинимаев З.Б., Баклаженко А.Г. Способ стабилизации земляного полотна в районах распространения вечной мерзлоты с применением инновационных материалов // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 92–96.
10. Кирпичников К.А., Дашинимаев З.Б., Сигачев Н.П. Устройство дренажных сооружений в районах вечной мерзлоты // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 96–101.
11. Подвербный В.А., Перельгина А.А. Принятие решения по выбору типа укрепления водоотводных и нагорных канав на основе метода идеальной точки // Транспорт Урала. 2021. № 2 (69). С. 57–62.
12. СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах : утв. приказом Минстроя РФ № 915/пр от 30.12.2020. Введ. 2021-07-01. М. : Минстрой России, 2020. 140 с.
13. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. М. : Научный мир, 2003, 316 с.
14. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. М. : Изд-во ЦПИ при мех.-мат. фак. МГУ, 2009. 88 с.
15. Самарский А.А. Теория разностных схем. М. : Наука, 1989. 616 с.
16. Валиев Н.А., Кондратьев В.Г. Эксперименты по стабилизации земляного полотна на центральном участке Байкало-Амурской магистрали с помощью солнцезащитных навесов // Инженерная геология. 2015. № 4. С. 56–63.
17. Валиев Н.А., Кондратьев В.Г. Результаты опытно-экспериментальных работ по охлаждению многолетнемерзлых грунтов в основании железнодорожного пути на центральном участке БАМ // Материалы Пятой конференции геокриологов России. Москва, 2016. Т. 1. С. 168–175.
18. Валиев Н.А., Кондратьев В.Г. Термокомплекс, защита от деградации оснований земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск, 2019. № 1. С. 538–541.

### References

1. Kondrat'ev V.G. Aktivnye sposoby ukrepleniya osnovaniya zemlyanogo polotna na vechnomerzlykh gruntakh [Active methods of strengthening the foundation of the roadbed on permafrost soils]. Chita: Zabtrans Publ., 2001. 100 p.
2. Kondrat'ev V.G. Stabilizatsiya zemlyanogo polotna na vechnomerzlykh gruntakh [Stabilization of the roadbed on permafrost soils]. Chita: Poligraf-Resurs Publ., 2011. 176 p.
3. Kondrat'ev V.G., Korolev A.A., Karlinskii M.I., Pozin V.A., Rozanov A.S. Patent SU 1740555 A1, 15.06.1992.
4. Koven'kin D.A., Valiev N.A. Zashchita ot degradatsii mnogoletnemerzlykh gruntov na snegozanosimyykh uchastkakh [Protection from degradation of permafrost soils on snow-bearing areas]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2021, no. 11, pp. 23–26.
5. Podverbnyi V.A., Koven'kin D.A., Filatov E.V., Ivashevich A.A. Zashchita vodopropusknoi truby na zheleznoi doroge ot vozdeistviya naledi [Protection of the culvert on the railway from the effects of ice]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2 t) [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]*. Chita, 2018, vol. 1, pp. 136–146.
6. Podverbnyi V.A., Perelygina A.A., Gagarin L.Yu., Uralskii D.A. Prinyatie reshenii pri vybore konstruktssii i parametrov sezonnykh okhlazhdayushchikh ustroystv [Decision-making when choosing designs and parameters of seasonal cooling devices]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» [Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production»]*. Chita, 2019, pp. 147–160.
7. Podverbnyi V.A., Koven'kin D.A., Filatov E.V., Valiev N.A. Perspektivy transportnogo, promyshlennogo, grazhdanskogo stroitel'stva v Taishet'skom raione Irkutskoi oblasti i predotvrashchenie degradatsii mnogoletnemerzlykh gruntov [Prospects of transport,

industrial, civil construction in the Taishet district of the Irkutsk region and prevention of degradation of permafrost soils]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production»]. Chita, 2019, pp. 129–147.

8. Pevzner V.O., Petropavlovskaya I.B., Suslov O.A. [et al.]. Rabota puti v usloviyakh tyazhelovesnogo dvizheniya [Railway operation in heavy traffic conditions]. *Trudy XIII Mezhduнародnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti»*. Chitaniya, posvyashchennyye pamyati professora G.M. Shakhunyantsa [Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference «Modern problems of railway track design, construction and operation». Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhunyants], 2016, pp. 138–140.

9. Kirpichnikov K.A., Dashinimaev Z.B., Baklazhenko A.G. Sposob stabilizatsii zemlyanogo polotna v raionakh rasprostraneniya vechnoi merzloty s primeneniem innovatsionnykh materialov [A method for stabilizing the roadbed in permafrost distribution areas using innovative materials]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2 t)* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2018, vol. 1, pp. 92–96.

10. Kirpichnikov K.A., Dashinimaev Z.B., Sigachev N.P. Ustroystvo drenaznykh sooruzhenii v raionakh vechnoi merzloty [Installation of drainage structures in permafrost areas]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2 t)* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2018, Vol. 1, pp. 96–101.

11. Podverbnyi V.A., Perelygina A.A. Prinyatie resheniya po vyboru tipa ukrepleniya vodootvodnykh i nagornykh kanav na osnove metoda ideal'noi tochki [Decision-making on the choice of the type of strengthening of drainage and upland ditches based on the ideal point method]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2021, no. 2 (69), pp. 57–62.

12. Osnovaniya i fundamente na vechnomerzlykh gruntakh, SP 25.13330.2020 (Grounds and foundations on permafrost soils, Set of rules 25.13330.2020). Moscow: Minstroj Publ., 2020. 140 p.

13. Samarskii A.A., Gulina A.V. Chislennyye metody matematicheskoi fiziki [Numerical methods of mathematical physics]. Moscow: Nauchnyi mir Publ., 2003. 316 p.

14. Leont'ev N.E. Osnovy teorii fil'tratsii [Fundamentals of filtration theory]. Moscow: Izd-vo TsPI pri mekhaniko-matematicheskome fakul'tete MGU, 2009. 88 p.

15. Samarskii A.A. Teoriya raznostnykh skhem [Theory of difference schemes]. Moscow: Nauka Publ., 1989. 616 p.

16. Valiev N.A., Kondrat'ev V.G. Eksperimenty po stabilizatsii zemlyanogo polotna na tsentral'nom uchastke Baikalo-Amurskoi magistrali s pomoshch'yu solntseosadkozashchitnykh navesov [Experiments on the stabilization of the roadbed on the central section of the Baikal-Amur highway with the help of sunshade canopies]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology], 2015, no. 4, pp. 56–63.

17. Valiev N.A., Kondrat'ev V.G. Rezul'taty opytно-eksperimental'nykh rabot po okhlazhdeniyu mnogoletnemerzlykh gruntov v osnovanii zheleznodorozhnogo puti na tsentral'nom uchastke BAM [Results of experimental work on the cooling of permafrost soils at the base of the railway track on the central section of the BAM]. *Materialy Pyatoi konferentsii geokriologov Rossii* [Materials of the Fifth Conference of geocryologists of Russia]. Moscow, 2016, vol. 1, pp. 168–175.

18. Valiev N.A., Kondrat'ev V.G. Termokompleks, zashchita ot degradatsii osnovanii zemlyanogo polotna na mnogoletnemerzlykh gruntakh [Thermocomplex, protection from degradation of the foundations of the roadbed on permafrost soils]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2019, no. 1, pp. 538–541.

### Информация об авторах

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

**Насников Дмитрий Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: nasnikov\_dn@irgups.ru.

**Чернецкая Ирина Сергеевна**, старший преподаватель кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: irina.irk@bk.ru.

### Information about the authors

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

**Dmitrii N. Nasnikov**, Ph.D in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Track and track facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: nasnikov\_dn@irgups.ru.

**Irina S. Chernetskaya**, Assistant Professor of the Department of Track and track facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: irina.irk@bk.ru.

## Математическая модель расчета потерь в тяговых электродвигателях пульсирующего тока

Ю.А. Давыдов, В.В. Заболотный, О.О. Мухин ✉

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

✉muhinoo@mail.ru

### Резюме

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2021 г. № 1100-р утвержден паспорт инвестиционного проекта, целевым показателем которого является увеличение провозной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей в 1,5 раза, до 180 млн т в год, в том числе в 2021 г. – 144 млн т, в 2022 г. – 158 млн т, в 2023 г. – 173 млн т, в 2024 – 180 млн т. Достижение целевых показателей также обусловлено вождением грузовых поездов массой 7 100 т на всем полигоне обращения, что, несомненно, приведет к увеличению случаев эксплуатации тяговых электродвигателей электровозов серии 3,4 ЭС5К в диапазоне тока часового режима и, как следствие, к их существенному нагреву. Одним из основных факторов, влияющих на нагрев узлов электродвигателей, являются потери (электрические, магнитные, механические и др.). На долю тяговых электродвигателей приходится более одной пятой всех отказов. Использование электровозов с вышедшим из строя хотя бы одним тяговым электродвигателем может привести к привлечению вспомогательных локомотивов, нарушению графика движения поездов и, соответственно, к неисполнению целевых показателей. В статье выполнен анализ потерь, возникающих в тяговом электродвигателе НБ-514Е при эксплуатации, разработана гибкая математическая модель, позволяющая выполнять расчет потерь для различных тяговых электродвигателей пульсирующего тока. С ее помощью выполнен расчет потерь для электродвигателя НБ-514Е на участке от ст. Смольяниново до ст. Находка (четное направление) с лимитирующим уклоном 28 ‰.

### Ключевые слова

тяговый электродвигатель НБ-514Е, электрические машины, локомотив, математическая модель, Восточный полигон, потери в тяговых электродвигателях, нагрев узлов электродвигателя, сплайновая интерполяция

### Для цитирования

Давыдов Ю.А. Математическая модель расчета потерь в тяговых электродвигателях пульсирующего тока / Ю.А. Давыдов, В.В. Заболотный, О.О. Мухин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 91–101. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).91-101.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 7.08.2022 г.; поступила после рецензирования: 7.09.2022 г.; принята к публикации: 8.09.2022 г.

## Mathematical model for calculating losses in pulsed current traction motors

Yu.A. Davydov, V.V. Zabolotnyi, O.O. Mukhin ✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉muhinoo@mail.ru

### Abstract

By decree of the Government of the Russian Federation dated April 28, 2021 No. 1100-r, an investment project passport was approved, the target indicator being increasing the carrying capacity of the Baikal-Amur and Trans-Siberian railways by one and a half times, up to 180 million tons per year, including in 2021 year - 144 million tons, in 2022 – 158 million tons, in 2023 – 173 million tons, in 2024 – 180 million tons. Achieving the target values is also due to the driving of freight trains weighing 7100 tons throughout the entire circulation area, which undoubtedly results in an increase in the cases of traction electric motors operation in the 3.4 ES5K series locomotives in the hourly mode current range and, as a result, to its significant heating. One of the main factors affecting the heating of electric motor units are losses (electrical, magnetic, mechanical, and others). Traction motors account for more than one-fifth of all failures. The use of electric locomotives with at least one traction motor out of order can lead to the involvement of auxiliary locomotives, disruption of the train schedule and, as a result, failure to meet targets. The article analyzes the losses that occur in the NB-514E traction electric motors during operation developing a flexible mathematical model that allows to calculate losses for various pulsating current traction electric motors. Using the model developed, the calculation was performed of losses for the NB-514E electric motor in the section from the railway station Smolyaninovo to the Naходка railway station (even direction) with a limiting slope of 28‰.

### Keywords

traction electric motor NB-514E, electric machines, locomotive, mathematical model, Eastern polygon, losses in traction electric motors, heating of electric motor units, spline interpolation

**For citation**

Davydov Yu.A., Zabolotnyi V.V., Mukhin O.O. Matematicheskaya model' rascheta poter' v tyagovykh elektrodvigatelyakh pul'siruyushchego toka [Mathematical model for calculating losses in pulsed current traction motors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 91–101. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).91-101.

**Article Info**

Received: August 7, 2022; Revised: September 7, 2022; Accepted: September 8, 2022.

**Введение**

Одна из приоритетных задач в сфере железнодорожного транспорта – повышение надежности и безопасности перевозочного процесса [1–4]. Особое внимание уделяется техническому состоянию важных узлов подвижного состава, один из которых – тяговый электродвигатель (ТЭД) [5].

Увеличение массы и длины грузовых поездов ведет к увеличению нагрузки на ТЭД и его существенному нагреву, который, по своей сути, возникает в результате потерь на его узлах. Наиболее типичной приводимой в литературных источниках температурно-временной зависимостью, используемой в практических расчетах температуры перегрева обмоток электрических машин, является экспонента, формально соответствующая классической теории нагрева однородного тела [6, 7]. Такой подход

не учитывает влияние потерь в узлах двигателя и не позволяет оценить его нагрев поэлементно.

Простота и доступность расчета потерь, а также создание гибкой математической модели позволят оценить уровень влияния таких потерь на нагрев каждого из узлов электрической машины.

**Потери в тяговом электродвигателе НБ-514Е**

Потери в тяговых двигателях складываются из электрических  $\Delta P_{\text{э}}$  (в меди),  $\Delta P_{\text{тщ}}$  (под щетками), магнитных  $\Delta P_{\text{маг}}$  (в стали), добавочных  $\Delta P_{\text{доб}}$  (при нагрузке), механических: при трении щеток о коллектор  $\Delta P_{\text{пщ}}$ , при трении в подшипниках  $\Delta P_{\text{подш}}$ . Суммарные потери рассчитываются как [6, 7]:

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta P = & \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{доб}} + \\ & + \Delta P_{\text{тщ}} + \Delta P_{\text{пщ}} + \Delta P_{\text{подш}} \end{aligned} \quad (1)$$

**Таблица 1.** Суммарные потери в тяговом электродвигателе электровоза серии ЗЭС5К  
**Table 1.** Total losses in the traction electric motor of the ZES5K series electric locomotive

Позиция	Значение	Ток, А									
		300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200
1	V, км/ч	23,6	19,1	16	14,7	13,5	12,3	11,1	10	9,8	2,6
	n, об/мин	419	339	284	261	240	219	197	178	174	46
	P сумм, Вт	11 850	12 927	15 132	18 522	22 599	27 322	32 695	38 778	45 695	51 417
2	V, км/ч	48,6	39,5	34,2	30	29,1	27,2	25,2	24,6	–	–
	n, об/мин	863	702	608	533	517	483	448	437	–	–
	P сумм, Вт	21 094	19 933	21 102	23 392	27 537	31 979	37 048	43 343	–	–
3	V, км/ч	72	59,1	50,1	45,5	42,5	40	37,1	33,8	–	–
	n, об/мин	1 279	1 050	890	808	755	711	659	600	–	–
	P сумм, Вт	32 032	28 253	27 421	29 304	32 582	36 719	41 374	46 694	–	–
4	V, км/ч	95,6	77,6	67,1	61,1	57,4	54,6	52	49,4	–	–
	n, об/мин	1 698	1 379	1 192	1 085	1 020	970	924	878	–	–
	P сумм, Вт	45 303	37 534	35 318	36 248	39 063	42 961	47 634	53 217	–	–
ОП 1	V, км/ч	–	96,7	78,9	69	63,5	59,6	56,3	53,3	–	–
	n, об/мин	–	1 718	1 402	1 226	1 128	1 059	1 000	947	–	–
	P сумм, Вт	–	48 570	41 491	40 145	41 981	45 303	49 614	55 012	–	–
ОП 2	V, км/ч	–	–	97,7	81,5	72,4	66,9	62,9	59,6	–	–
	n, об/мин	–	–	1 736	1 448	1 286	1 189	1 117	1 059	–	–
	P сумм, Вт	–	–	52 499	46 833	46 515	48 910	52 806	58 052	–	–
ОП 3	V, км/ч	–	–	–	99,6	84,6	75,6	69,4	64,7	–	–
	n, об/мин	–	–	–	1 769	1 503	1 343	1 233	1 149	–	–
	P сумм, Вт	–	–	–	57 653	53 262	53 499	56 129	60 640	–	–

По формуле (1) выполнен расчет для электровоза ЗЭС5К на каждой позиции регулирования, результаты которого приведены в табл. 1.

На рис. 1 показаны зависимости суммарных потерь от тока для всех позиций регулирования.

Всем известен факт, что на величину электрических потерь влияет температура проводника, В ТЭД это обмотки главных и доба-

вочных полюсов, компенсационная, а также обмотка якоря. На рис. 2 представлена зависимость сопротивления обмоток от температуры.

На рис. 2  $\Sigma r$  – суммарное сопротивление, Ом;  $r_{я}$  – сопротивление в обмотке якоря, Ом;  $r_{ко}$  – сопротивление в компенсационной обмотке, Ом;  $r_{ов}$  – сопротивление в обмотке главных полюсов, Ом;  $r_{од}$  – сопротивление в обмотке добавочных полюсов, Ом. На основании расчета суммарных сопротивлений для ТЭД в диапа-

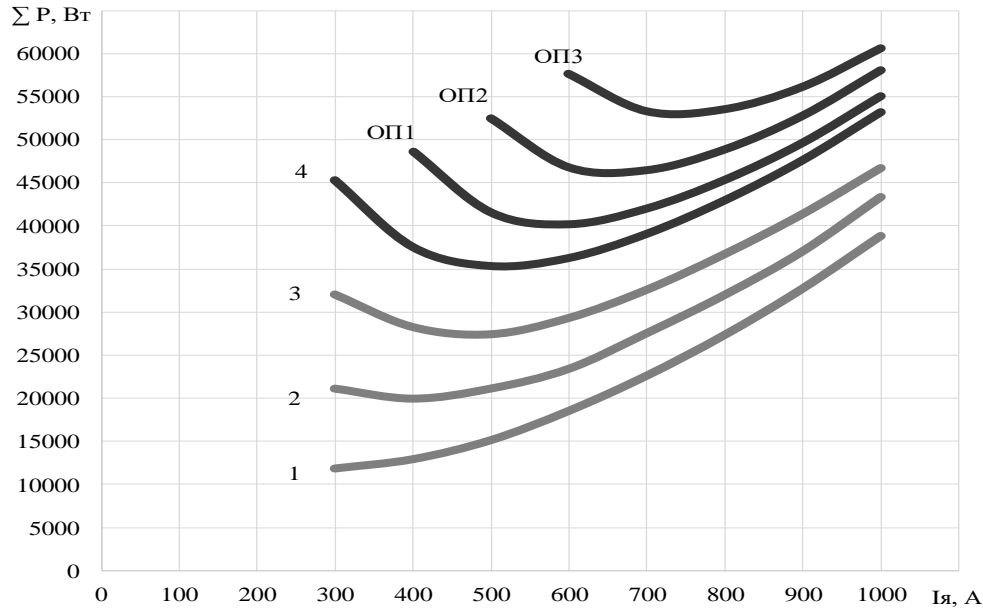


Рис. 1. Характеристика зависимости суммарных потерь от тока двигателя при неизменной температуре 20 °С

Fig. 1. Characteristic of the dependence of the total losses on the motor current at a constant temperature of 20 °С

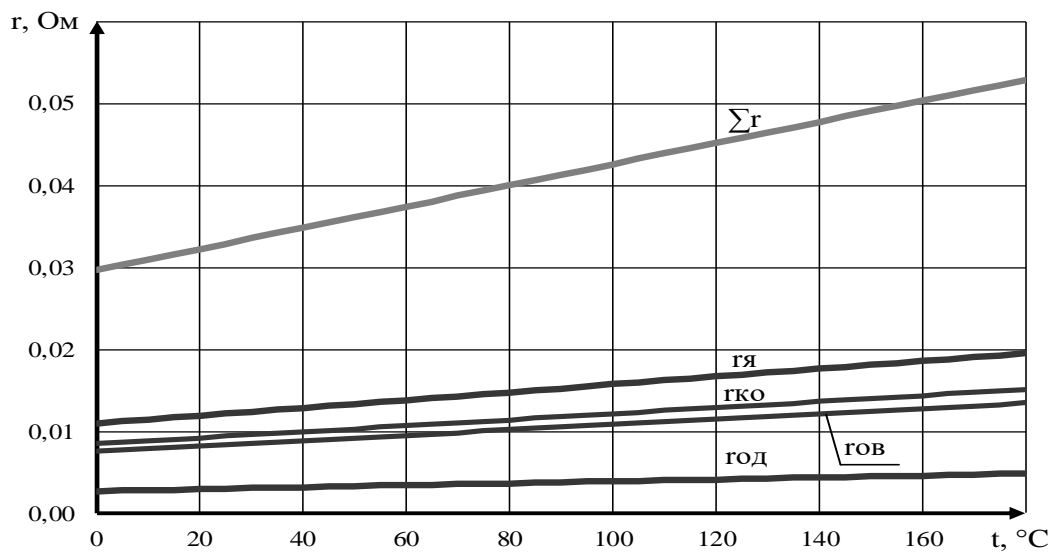


Рис. 2. Зависимость сопротивления обмоток от температуры

Fig. 2. Winding resistance dependence temperature

зоне температур от 0 до 180 °С (с шагом 5 °С) построены трехмерные графики, отражающие зависимость сопротивления от двух параметров, тока и температуры.

Не требует дополнительных подтверждений тот факт, что максимальные потери возникают на четвертой позиции регулирования. Это обусловлено более высокими скоростями вра-

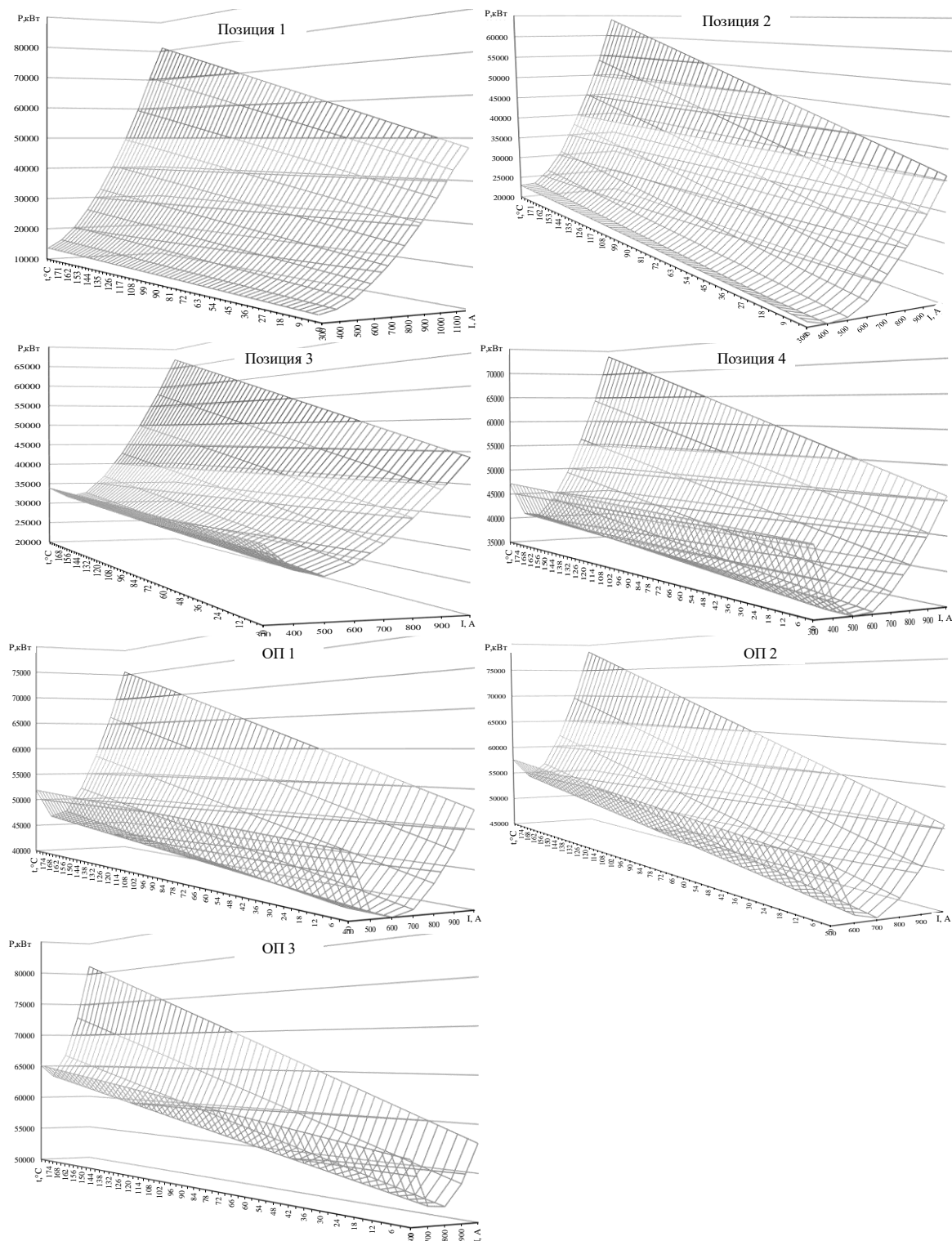


Рис. 3. Графики зависимости суммарных потерь от тока и температуры  
Fig. 3. Graphs of dependence of total losses on current and temperature

нения вала якоря и, следовательно, существенными магнитными потерями, которые в среднем составляют 40–45 % от всех потерь в ТЭД [8–11].

Представленные графики демонстрируют, что с ростом температуры увеличиваются и суммарные потери, это обусловлено повышением сопротивления меди и, как следствие, возрастанием электрических потерь токоведущих элементов ТЭД.

### Разработка математической модели расчета потерь в тяговых электродвигателях пульсирующего тока

Утверждение, что электрические потери напрямую зависят от сопротивления проводника, а оно, в свою очередь, зависит от температуры, не требует дополнительных доказательств [1–4, 12]. Тогда, для создания математической модели, позволяющей рассчитать электрические потери, необходимо и достаточно составить уравнение, описывающее тепловую характеристику исследуемых элементов, а именно: обмоток якоря, главных и дополнительных полюсов, компенсационной обмотки. Способы и примеры описания подобных характеристик представлены в ряде источников [13–23]. Наиболее точно описать  $i$ -ое значение тока на графике позволяет такой математический инструмент, как сплайно-

вая интерполяция [18]:

$$f(I) = \sum_{k=0}^n a_{ik} I_i^k, \quad (2)$$

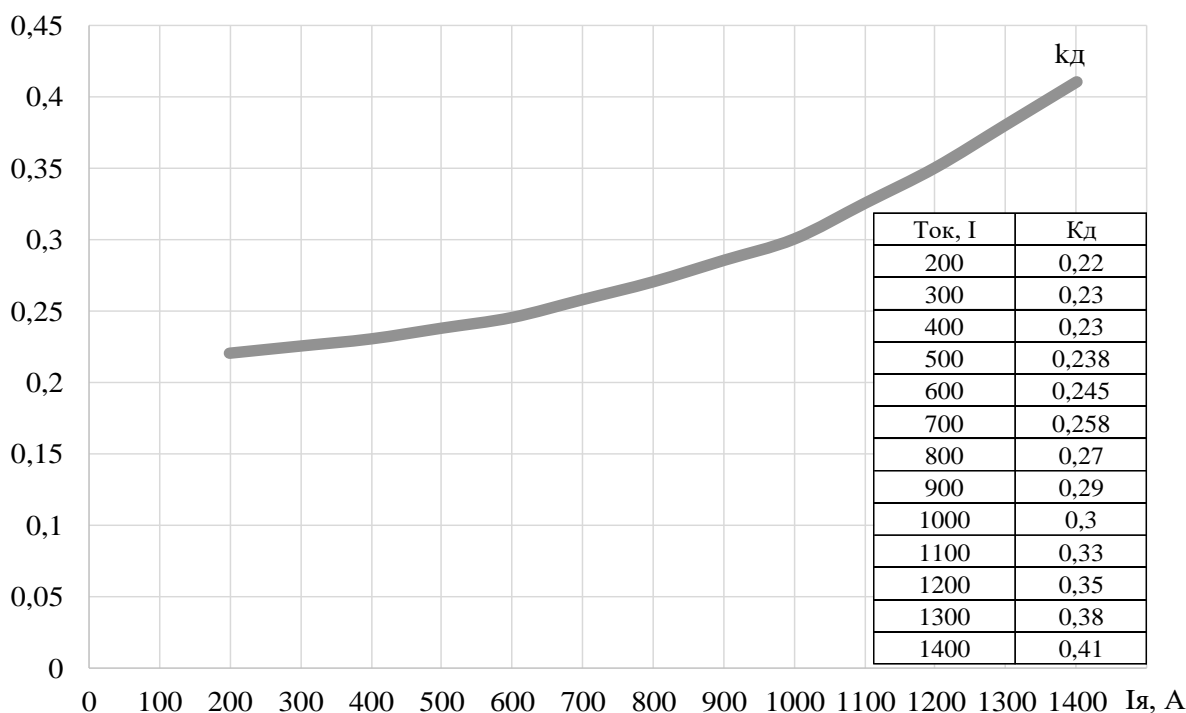
где  $I_{i-1} < I_i < I_{i+1}$   $a_{ik}$  – числовой коэффициент,  $n$  – степень полинома;  $i$  – порядковый номер в интерполируемом ряду;  $I$  – ток, А.

При помощи указанного математического инструмента описаны реальные тепловые характеристики элементов ТЭД НБ-514Е, которые были получены экспериментальным путем на стенде в рамках исследований, проводимых НЭВЗ-Электротех [21].

Изменение коэффициента добавочных потерь в зависимости от тока, который также необходим для разработки математической модели, предоставлено на рис. 4.

Фрагмент готового программного кода на базе пакета программы компьютерной алгебры Maple (2020) имеет следующий вид:

```
>
1. restart; with(stats); with(plots);
with(linalg); with(LinearAlgebra); with(Statistics);
Digits := 6;
>
2. «Input data»;
3. li := [];
4. V := [];
5. T := [];
```



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента добавочных потерь от тока двигателя  
**Fig. 4.** Dependence of the coefficient of additional losses on the motor current



- >
- 6. «Motor parameters»:
  - 7. R := []; ma :=; mz :=; Ba :=; Bz :=; po :=;
  - ph :=; Sh :=; Dk :=; Up :=; In :=;
  - 8. Tn := []; To := []; t[1][0] :=; t[2][0] :=;
  - t[3][0] :=; t[4][0] :=;
  - >
  - 9. «Thermal characteristics»:
    - 10. X := [0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200, 1250];
    - 11. Y[1] := [0, 6.7, 13.53, 20.3, 27, 33.8, 40.6, 46.6, 52, 58.5, 65, 71, 77, 91.5, 106, 119.2, 132.3, 145.6, 154, 159, 188, 217, 233.5, 250, 265, 280];
    - 12. Y[2] := [0, 3.53, 7.07, 10.6, 14.15, 17.7, 21.2, 25.3, 30, 38.5, 47, 55.5, 64, 79.5, 95, 109.5, 124.1, 142.3, 160, 164, 202, 240, 308.2, 376.5, 444.7, 513];
    - 13. Y[3] := [0, 3.53, 7.07, 10.6, 14.15, 17.7, 21.2, 25.3, 30, 38.5, 47, 55.5, 64, 79.5, 95, 109.5, 124.1, 142.3, 160, 164, 202, 240, 308.2, 376.5, 444.7, 513];
    - 14. Y[4] := [0, 2.9, 5.85, 8.77, 11.7, 14.6, 17.54, 20.67, 24, 33, 42, 51, 60, 75, 90, 105.9,

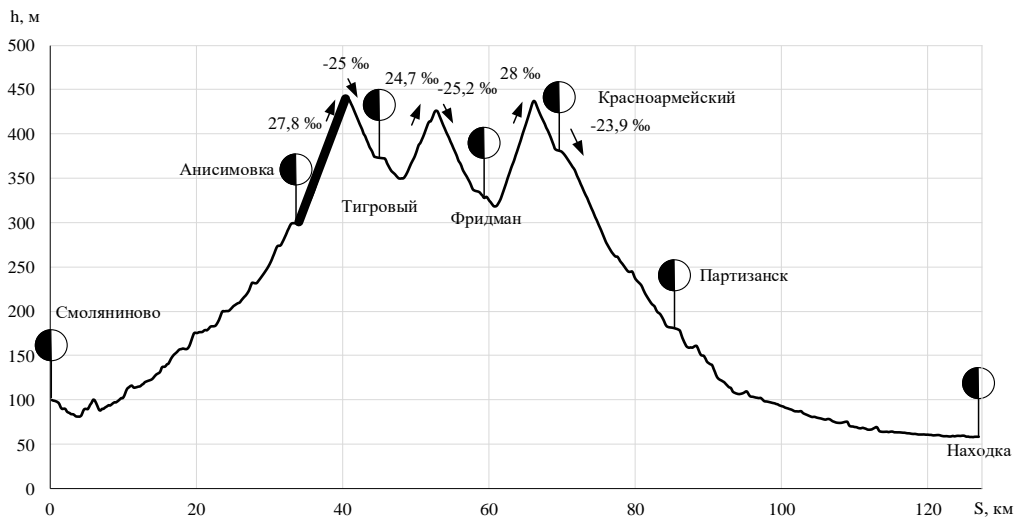


Рис. 5. Профиль участка пути Транссибирской магистрали от ст. Смоляниново до ст. Находка  
 Fig. 5. Profile of the track section of the Trans-Siberian Railway from Smolyaninovo station to Nakhodka station

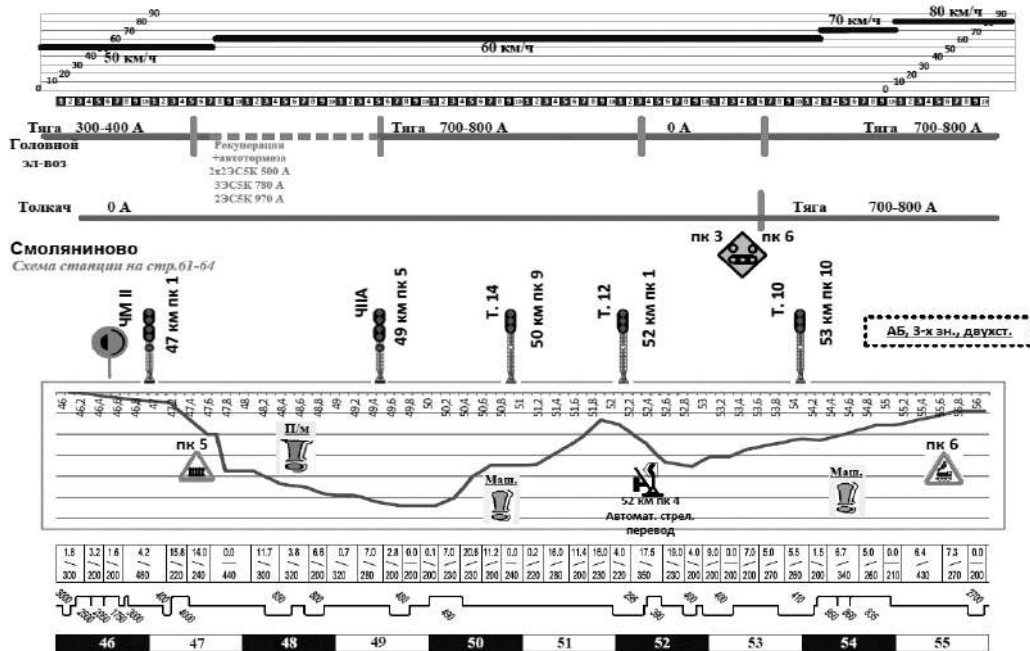


Рис. 6. Режимная карта машинисту на участке Смоляниново – Находка  
 Fig. 6. Regime card for the driver on the section Smolyaninovo – Nakhodka

121.8, 139, 154, 159, 230.8, 287.2, 320.2, 352.6, 384.2, 415.8];

15. r[1] := proc (x) options operator, arrow, function\_assign; spline(X, Y[1], x, linear) end proc; r[2] := proc (x) options operator, arrow, function\_assign; spline(X, Y[2], x, linear) end proc; r[3] := proc (x) options operator, arrow, function\_assign;

Из представленного выше фрагмента программного кода видно, что математическая модель является «гибкой», так как в строке 6–8 «Motor parameters» имеется возможность внесения различных геометрических параметров электрических машин коллекторного типа. Также в строках 9–14 имеется возможность внесения и корректировки тепловых характеристик. В конкретной приведенной математической модели представлены тепловые характе-

ристики тягового электродвигателя НБ-514Е электровозов новых серии ЗЭС5К.

### Применение разработанной математической модели

В качестве объекта для использования разработанной математической модели расчета потерь электродвигателя выбран электровоз серии 4ЭС5К с ТЭД НБ-514Е, следующий по участку Транссибирской магистрали от ст. Смоляниново до ст. Находка (рис. 5). Данный участок выбран по причине его сложности и разнообразия режимов ведения локомотива и, следовательно, возможности проверки модели для различных режимов работы ТЭД.

Участок от Смоляниново до Находки имеет три лимитирующих по подъему перевала от ст. Анисимовка до ст. Тигровый – 27,8 %, от

**Таблица 2.** Суммарные потери в тяговом электродвигателе электровоза серии ЗЭС5К  
**Table 2.** Total losses in the traction electric motor of the ZES5K series electric locomotive

Режим Mode	Ток Current, А	Скорость, км/ч; Speed, km/h	Обороты, об/мин; Revolutions rh	Расстояние, км; Distance, km	Расстояние от начала движения, км; Distance from start, km	Время, мин; Time, min	Время от начала движения, мин; Time from start, min	$P_{\text{эл}}$ кВт	$P_{\text{мех}}$ кВт	$P_{\text{аэро}}$ кВт	$P_{\text{тр}}$ кВт	$P_{\text{вент}}$ кВт	$P_{\text{вент}}$ кВт	$P_{\text{вент}}$ кВт	$P_{\text{вент}}$ кВт	$P_{\text{вент}}$ кВт	
T	400	50	888	0	0,00	0,00	0,00	2,056	1,417	0,510	1,590	0,00	2,43	2,28	0,80	1,94	13,0
T	400	50	888	1,5	1,50	1,80	1,80	2,068	1,415	0,510	1,590	0,00	2,43	2,28	0,80	1,94	13,0
P	750	60	1066	2	3,50	2,00	3,80	7,451	5,054	1,834	5,721	0,00	3,58	2,73	1,50	1,94	29,8
T	800	60	1066	2,8	6,30	2,80	6,60	8,786	5,894	2,161	6,740	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	33,5
B	0	60	1066	1,3	7,60	1,30	7,90	0,000	0,000	0,000	0,000	14,92	0,00	2,73	0,00	1,94	19,6
T	800	60	1066	0,7	8,30	0,70	8,60	8,768	5,855	2,151	6,708	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	33,4
T	800	70	1244	0,8	9,10	0,69	9,29	8,836	5,889	2,167	6,759	0,00	4,56	3,19	1,60	1,94	34,9
T	800	80	1421	0,9	10,00	0,68	9,96	8,90	5,92	2,18	6,81	0,00	5,54	3,64	1,60	1,94	36,5
T	800	80	1421	1	11,00	0,75	10,71	8,97	5,96	2,20	6,86	0,00	5,54	3,64	1,60	1,94	36,7
B	0	80	1421	1	12,00	0,75	11,46	0,00	0,00	0,00	0,00	22,58	0,00	3,64	0,00	1,94	28,2
T	800	80	1421	0,4	12,40	0,30	11,76	8,94	5,92	2,19	6,83	0,00	5,54	3,64	1,60	1,94	36,6
T	800	60	1066	1,8	14,20	1,80	13,56	9,11	6,01	2,23	6,95	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	34,2
T	800	70	1244	3,1	17,30	2,66	16,22	9,34	6,13	2,29	7,13	0,00	4,56	3,19	1,60	1,94	36,2
T	800	60	1066	2,7	20,00	2,70	18,92	9,55	6,24	2,34	7,28	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	35,3
T	800	60	1066	1	21,00	1,00	19,92	9,61	6,27	2,35	7,33	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	35,5
T	800	70	1244	2	23,00	1,71	21,63	9,73	6,34	2,38	7,42	0,00	4,56	3,19	1,60	1,94	37,1
T	800	80	1421	2,6	25,60	1,95	23,58	9,85	6,40	2,41	7,51	0,00	5,54	3,64	1,60	1,94	38,9
B	0	80	1421	0,7	26,30	0,53	24,11	0,00	0,00	0,00	0,00	22,58	0,00	3,64	0,00	1,94	28,2
T	800	80	1421	0,6	26,90	0,45	24,56	9,82	6,38	2,40	7,48	0,00	5,54	3,64	1,60	1,94	38,8
T	800	60	1066	3,1	30,00	3,10	27,66	10,00	6,48	2,44	7,61	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	36,5
T	800	60	1066	2,9	32,90	2,90	30,56	10,15	6,57	2,48	7,72	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	36,9
T	500	60	1066	0,4	33,30	0,40	30,96	3,96	2,56	0,97	3,01	0,00	3,22	2,73	1,00	1,94	19,4
T	500	70	1244	0,8	34,10	0,69	31,64	3,95	2,56	0,96	3,00	0,00	4,01	3,19	1,00	1,94	20,6
T	850	70	1244	0,7	34,80	0,60	32,24	11,46	7,42	2,79	8,71	0,00	4,69	3,19	1,70	1,94	41,9
T	850	60	1066	0,7	35,50	0,70	32,94	11,51	7,45	2,81	8,75	0,00	3,76	2,73	1,70	1,94	40,6
T	850	65	1155	1,2	36,70	1,11	34,05	11,58	7,50	2,83	8,81	0,00	4,22	2,96	1,70	1,94	41,5
T	850	55	977	0,4	37,10	0,44	34,49	11,61	7,52	2,83	8,84	0,00	3,33	2,51	1,70	1,94	40,3
T	950	55	977	2,9	40,00	3,16	37,65	14,83	9,60	3,64	11,34	0,00	3,67	2,51	1,90	1,94	49,4
T	950	50	888	1,6	41,60	1,92	39,57	15,00	9,72	3,69	11,50	0,00	3,22	2,28	1,90	1,94	49,2
B	0	50	888	0,4	42,00	0,48	40,05	0,00	0,00	0,00	0,00	11,60	0,00	2,28	0,00	1,94	15,8
P	750	50	888	3,2	45,20	3,84	43,89	9,34	6,05	2,29	7,13	0,00	2,78	2,28	1,50	1,94	33,3
P	750	55	977	1,8	47,00	1,96	45,85	9,36	6,07	2,29	7,14	0,00	3,17	2,51	1,50	1,94	34,0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
P	750	70	1244	4,6	127,00	3,94	120,47	8,26	5,25	1,95	6,08	0,00	4,46	3,19	1,50	1,94	32,6

ст. Тигровый до ст. Фридман – 24,7 % и от ст. Фридман до ст. Красноармейский – 28 %. С учетом преодоления сложных перевальных участков, максимальный вес поезда принят 6 300 т, при использовании локомотива серии 4ЭС5К в голове поезда и в хвосте (толкач).

На рис. 6 представлена режимная карта машинисту на участке Смоляниново – Находка.

Входные данные для расчета – числовые массивы с информацией о поездке локомотива из микропроцессорной системы управления либо нормативные значения из утвержденной режимной карты для рассматриваемого участка работы.

Приведен расчет на основании данных из режимной карты движения локомотива на участке Смоляниново – Находка.

Данные, полученные по этим значениям, сведены в табл. 2. Режимы движения поезда: Т

– тяга, В – выбег, Р – рекуперация.

Результатом расчета, выполненного при помощи программы, являются графики зависимости тока, скорости и потерь от времени для ТЭД локомотива 4ЭС5К с поездом весом 6 300 т и толкачем в хвосте на участке Смоляниново – Находка (рис. 7).

Из графика видно, что наибольших, пиковых значений достигают магнитные потери в стали якоря; на втором месте электрические потери; на третьем – потери в компенсационной обмотке.

### Заключение

Результатом исследования, описанного в статье, является математическая модель и программа, позволяющие на основании данных микропроцессорной системы управления локомотивом или режимных карт машиниста выполнить расчет потерь для различных элементов ТЭД

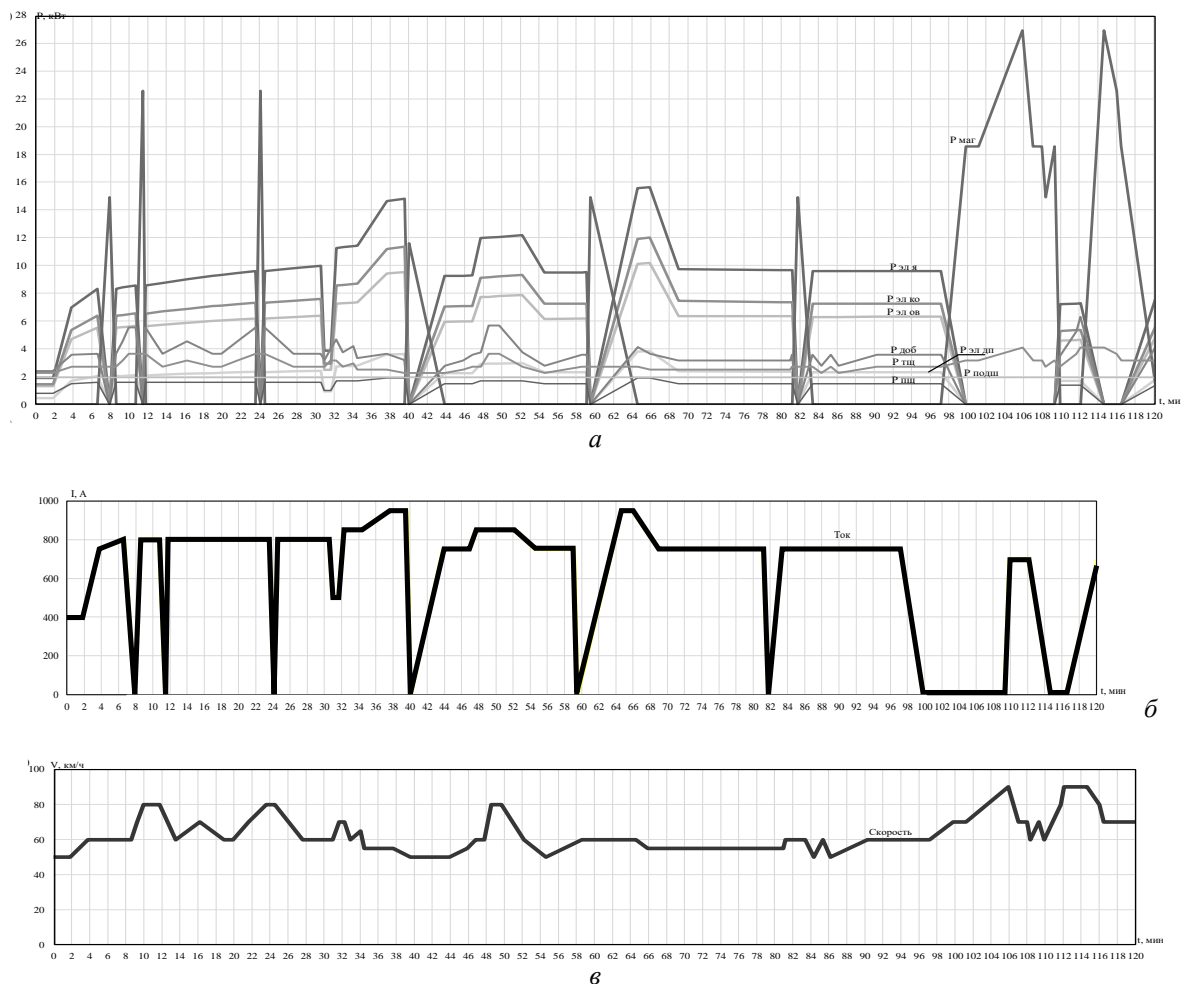


Рис. 7. График зависимости тока, скорости и потерь от времени:

*a* – графики потерь; *б* – график тока; *в* – график скорости

Fig. 7. Graph of current, speed and losses from time:

*a* – loss graphs; *b* – current graph; *c* – speed graph

пульсирующего тока с учетом температуры окружающей среды. Выполнен расчет потерь для одного из самых напряженных участков Дальневосточной железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Модель и программа могут быть испол-

зованы при составлении или корректировке режимных карт; уточнении весовых норм; совершенствовании программного кода микропроцессорной системы управления локомотивом.

### Список литературы

1. Шрайбер М.А. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя постоянного тока // Бюл. результатов науч. исследований. 2014. № 4 (13). С. 36 – 38.
2. Дурандин М.Г., Кузьминых И.А. Расчет электрических полей в якорной изоляции тяговых электродвигателей локомотивов с учетом теплового фактора // Вестник УрГУПС. 2010. № 4 (8). С. 30 – 37.
3. Дворкин П.В., Курилкин Д.Н. Анализ теплового состояния тяговых электродвигателей по данным микропроцессорной системы управления // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. № 3. С. 401 – 409.
4. Прибылова Н.В., Филонов С.А., Аксенов И.И. Потери на вихревые токи в обмотках электрических машин, вынесенных в воздушный зазор // Наука вчера, сегодня, завтра : материалы научно-практической конференции. Воронеж, 2016. С. 236 – 239.
5. Пономарчук Ю.В., Пляскин А.К., Кейно М.Ю. Методика обработки и анализа данных бортовых устройств регистрации параметров работы локомотивов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2018. № 2. С. 58 – 68.
6. Давыдов Ю.А., Пляскин А.К. Тяговые электрические машины. Хабаровск : ДВГУПС, 2012. 126 с.
7. Давыдов Ю.А. Тяговые электрические машины. Хабаровск : ДВГУПС, 2006. 116 с.
8. Гребенников Н.В., Харченко П.А. Определение энергетических параметров при ведении поезда // Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2021. С. 193 – 197.
9. Зарифьян А.А., Мустафин А.Ш. Изучение электромеханических процессов в коллекторном тяговом двигателе с учетом потерь // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3(83). С. 81 – 89.
10. Фошкина Н.В., Кудинов И.А. Повышение энергоэффективности электровозов 2(3,4)ЭС5К // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2016. №4 (74). С. 10 – 18.
11. ГОСТ 2582-81 Машины электрические вращающиеся тяговые. Утвержден постановлением N 2598 от 26 мая 1981 г. Гос. комитета СССР по стандартам. Введен в действие: 01.01.1983. М. : Издательство стандартов, 1981. 34 с.
12. Проектирование тяговых электрических машин / М.Д. Находкин, Г.В. Василенко, В.И. Бочаров [и др.]. М. : Транспорт, 1976. 624 с.
13. Юдина О.И. Математическое моделирование добавочных потерь в двигателях постоянного тока при пульсирующем питании : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ставрополь, 2008. 146 с.
14. Валентейчик А.Г. Методология расчета потерь электроэнергии в шестичко-коллекторном узле тяговых двигателей постоянного тока // Вестник транспорта Поволжья. 2009. №1 (17). С. 63 – 65.
15. Седова И.Ю., Юдина О.И. Моделирование добавочных потерь в системе «двигатель постоянного тока - силовой полупроводниковый преобразователь» // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. 2011. № 1. С. 57-62.
16. Афанасов А.М. Выбор методов определения механических потерь в тяговых электродвигателях постоянного и пульсирующего тока // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2010. № 32. С. 151 – 154.
17. Гермидер О.В., Попов В.Н. Математическое моделирование процесса переноса тепла в прямоугольном канале в зависимости от числа Кнудсена // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ : материалы VII Всероссийской научной молодежной школы-семинара имени Е.В. Воскресенского с международным участием. Саранск, 2016. С. 34–36.
18. Дьяконов В.П. Энциклопедия компьютерной алгебры : [Mathcad, Maple, MATLAB, Mathematica, Derive, MuPAD; аналитические и численные вычисления и их визуализация; сотни примеров математических расчетов]. М. : ДМК Пресс, 2012. 1263 с.
19. Афанасов А.М. Энергетические показатели механического способа компенсации электрических потерь в тяговых электродвигателях при их взаимной нагрузке // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2010. № 35. С. 69 – 73.
20. Афанасов А.М. Универсальные характеристики магнитных потерь в тяговых электрических машинах // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2010. № 31. С. 77 – 80.
21. Паспорт НБ-514Е 6ТС.155.040 ПС двигателя пульсирующего тока. Новочеркасск: Новочеркасский электровозостроительный завод, 2012. 17 с.
22. Блинов П.Н., Сковородников Е.И. Тяговые расчеты. Омск : ОмГУПС, 2015. 34 с.
23. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. М. : Маршрут, 2005. 448 с.

### References

1. Shraiber M.A. Modelirovaniye teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya postoyannogo toka [Modeling of the thermal state of a direct current traction motor]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of results of scientific research], 2014, no. 4 (13), pp. 36–38.

2. Durandin M.G., Kuzminykh I.A. Raschet elektricheskikh polei v yakonoi izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelyi lokomotivov s uchedom teplovogo faktora [Calculation of electric fields in the anchor insulation of traction electric motors of locomotives taking into account the thermal factor]. *Vestnik UrGUPS* [Bulletin of Ural State Transport University], 2010, no. 4 (8), pp. 30–37.
3. Dvorkin P.V., Kurilkin D.N. Analiz teplovogo sostoyaniya tyagovykh elektrodvigatelyi po dannym mikroprotsessornoi sistemy upravleniya [Analysis of the thermal state of traction motors according to the microprocessor control system]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of Saint Petersburg State Transport University], 2019, vol. 16, no. 3, pp. 401–409.
4. Pribylova N.V., Filonov S.A., Aksenov I.I. Poteri na vikhrevye toki v obmotkakh elektricheskikh mashin, vynesennykh v vozdushnyi zazor [Eddy current losses in the windings of electrical machines placed in the air gap]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii Nauka vchera, segodnya, zavtra* [Proceedings of scientific-practical conference «Science yesterday, today, tomorrow»]. Voronezh, 2016, pp. 236–239.
5. Ponomarchuk Yu.V., Plyaskin A.K., Keino M.Yu. Metodika obrabotki i analiza dannykh bortovykh ustroystv registratsii parametrov raboty lokomotivov [Methodology for Processing and Analyzing Data of Onboard Devices for Recording Locomotive Operation Parameters]. *Byulleten' Ob'edinennogo uchenogo soveta OAO «RZhD»* [Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC Russian Railways], 2018, no. 2, pp. 58–68.
6. Davydov Yu.A., Plyaskin A.K. Tyagovye elektricheskie mashiny [Traction electric machines]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2012. 126 p.
7. Davydov Yu.A. Tyagovye elektricheskie mashiny [Traction electric machines]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2006. 116 p.
8. Grebennikov N.V., Kharchenko P.A. Opredelenie energeticheskikh parametrov pri vedenii poezda [Determination of energy parameters when driving a train]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Transport: science, education, production»]. Rostov-on-Don, 2021, pp. 193–197.
9. Zarif'yan A.A., Mustafin A.Sh. Izuchenie elektromekhanicheskikh protsessov v kollektornom tyagovom dvigatele s uchedom poter' [Study of electromechanical processes in a commutator traction motor taking into account losses]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2021, no. 3(83), pp. 81–89.
10. Foshkina N.V., Kudinov I.A. Povyshenie energoeffektivnosti elektrovozov 2(3,4)ES5K [Increasing the energy efficiency of electric locomotives 2 (3,4) ES5K]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovostroyeniya* [Bulletin of the All-Russian Scientific Research and Design Institute of Electric Locomotive Building], 2016, no. 4(74), pp. 10–18.
11. Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye GOST 2582-81 (Electrical rotating traction machines. State Standard of the USSR 2582-81). Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1981. 34 p.
12. Nakhodkin M.D., Vasilenko G.V., Bocharov V.I., Kozorezov M.A. Proektirovanie tyagovykh elektricheskikh mashin [Design of traction electric machines]. Moscow: Transport Publ., 1976. 624 p.
13. Yudina O.I. Matematicheskoe modelirovanie dobavochnykh poter' v dvigatelyakh postoyannogo toka pri pul'siruyushchem pitanii [Mathematical modeling of additional losses in DC motors with pulsating power]. Ph.D's thesis. Stavropol, 2008. 146 p.
14. Valenteichik A.G. Metodologiya rascheta poter' elektroenergii v shchetochno-kollektornom uzle tyagovykh dvigatelyi postoyannogo toka [Methodology for calculating power losses in the brush-collector unit of DC traction motors]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region], 2009, no. 1 (17), pp. 63–65.
15. Sedova I.Yu., Yudina O.I. Modelirovanie dobavochnykh poter' v sisteme «dvigatel' postoyannogo toka - silovoi poluprovodnikovyi preobrazovatel'» [Modeling of additional losses in the system «DC motor-power semiconductor converter»]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the North Caucasian State Technical University], 2011, no. 1, pp. 57–62.
16. Afanasov A.M. Vybor metodov opredeleniya mekhanicheskikh poter' v tyagovykh elektrodvigatelyakh postoyannogo i pul'siruyushchego toka [The choice of methods for determining mechanical losses in traction motors of direct and pulsating current]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V. Lazaryana* [Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport after named Academic V. Lazaryan], 2010, no. 32, pp. 151–154.
17. Germider O.V., Popov V.N. Matematicheskoe modelirovanie protsessa perenosa tepla v pryamougol'nom kanale v zavisimosti ot chisla Knudsena [Mathematical modeling of the heat transfer process in a rectangular channel depending on the Knudsen number]. *Materialy VII Vserossiiskoi nauchnoi molodezhnoi shkoly-seminara imeni E.V. Voskresenskogo s mezhdunarodnym uchastiem «Matematicheskoe modelirovanie, chislennyye metody i kompleksy program»* [Proceedings of the VII All-Russian Scientific Youth School-Seminar named after E.V. Voskresenskii with international participation «Mathematical modeling, numerical methods and software packages»]. Saransk, 2016, pp. 34–36.
18. D'yakonov V.P. Entsiklopediya komp'yuternoï algebry. Mathcad, Maple, Mathematica, Drive, MuPAD. Analiticheskie i chislennyye vychisleniya i ikh vizualizatsiya; sotni primerov matematicheskikh raschetov [Encyclopedia of Computer Algebra. Mathcad, Maple, Mathematica, Drive, MuPAD. Analytical and numerical calculations and their visualization; hundreds of examples of mathematical calculations]. Moscow: DMK Press Publ., 2012. 1263 p.
19. Afanasov A.M. Energeticheskie pokazateli mekhanicheskogo sposoba kompensatsii elektricheskikh poter' v tyagovykh elektrodvigatelyakh pri ikh vzaimnoi nagruzke [Energy indicators of the mechanical method of compensating for electrical losses in traction motors with their mutual load]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V. Lazaryana* [Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport after named Academic V. Lazaryan], 2010, no. 35, pp. 69–73.

20. Afanasov A.M. Universal'nye kharakteristiki magnitnykh poter' v tyagovykh elektricheskikh mashinakh [Universal characteristics of magnetic losses in traction electric machines]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V. Lazaryana* [Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport after named Academic V. Lazaryan], 2010, no. 31, pp. 77–80.

21. Paspport NB-514E 6TS.155.040 PS dvigatelya pul'siruyushchego toka [Passport NB-514E 6TS.155.040 PS of a pulsating current motor]. Novocheerkassk: Novocheerkasskii elektrozostroitel'nyi zavod, 2012. 17 p.

22. Blinov P.N., Skovorodnikov E.I. Tyagovye raschety [Traction calculations]. Omsk: OmGUPS Publ., 2015. 34 p.

24. 23. Kuzmich V.D., Rudnev V.S., Frenkel' S.Ya. Teoriya lokomotivnoi tyagi [Theory of locomotive traction]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 448 p.

#### **Информация об авторах**

**Давыдов Юрий Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: puch@festu.khv.ru.

**Заболотный Владимир Владимирович**, аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: zabolotnyu\_vv@mail.ru.

**Мухин Олег Олегович**, аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: muhinoo@mail.ru.

#### **Information about the authors**

**Yurii A. Davydov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk; e-mail: puch@festu.khv.ru.

**Vladimir V. Zabolotnyi**, Ph.D. student of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk; e-mail: zabolotny\_vv@mail.ru.

**Oleg O. Mukhin**, Ph.D. student of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk; e-mail: muhinoo@mail.ru.

## Исследование методических погрешностей диагностических комплексов неразрушающего контроля

В.В. Кашковский✉, И.И. Тихий, И.Ю. Глинский, Ю.А. Корнило

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

viktor.kashkovskij@mail.ru

### Резюме

Поддержание парка грузовых вагонов в исправном состоянии в процессе грузоперевозок – важная народнохозяйственная задача. Большую роль в этом процессе играет инструментальный контроль вагонов. Одним из направлений такого контроля является разработка и создание комплексов неразрушающего контроля. В настоящее время группа компаний «Clean Technology Group» предлагает к поставке две разновидности комплексов для неразрушающего контроля серии «ИМК»: «ИМК-01» и «ИМКмб». Несмотря на очевидные плюсы самих комплексов «ИМК», их опытная эксплуатация показала, что метод контроля не вполне надежен и имеет ряд недостатков. Номенклатура объектов контроля крайне ограничена – только рамы тележек и цельнокатаные колеса. Исходя из этого возникла актуальная научно-практическая задача – усовершенствовать методологию диагностики неразрушающего контроля и программное обеспечение комплексов «ИМК», а также выполнить исследования по развитию и внедрению перспективных комплексов неразрушающего контроля. Для решения поставленной задачи были изучены методические погрешности существующей методики неразрушающего контроля на примере пяти деталей. Всего было произведено 150 экспериментов, в ходе которых установлено, что погрешности измерения достаточно большие, поэтому вероятность ошибок первого и второго рода (т. е. вероятность пропуска дефекта и выбраковка годной детали) также велика. Для решения задачи предложен метод спектрального анализа переходного процесса детали после удара. Данный метод достаточно чувствителен и надежен, с его помощью можно выявить даже незначительные дефекты.

### Ключевые слова

комплексы неразрушающего контроля, спектральный анализ, дефектоскопия, интеллектуальный молоток

### Для цитирования

Исследование методических погрешностей диагностических комплексов неразрушающего контроля / В.В. Кашковский, И.И. Тихий, И.Ю. Глинский, Ю.А. Корнило // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 102–111. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).102-111.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 24.06.2022 г.; поступила после рецензирования: 5.09.2022 г.; принята к публикации: 6.09.2022 г.

## Study of methodological errors of non-destructive testing diagnostic complexes

V.V. Kashkovskii, I.I. Tikhii, I.Yu. Glinskii, Yu.A. Kornilo

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉viktor.kashkovskij@mail.ru

### Abstract

Maintaining a fleet of freight cars in good condition during cargo transportation is an important economic task. Instrumental control of wagons plays an important role in this process. One of the directions of such control is the development and creation of non-destructive testing complexes. Currently, the CTG group of companies offers for delivery two types of complexes for non-destructive testing of the IMC series: «IMK-01» and «IMKmb». Despite the obvious advantage of the IMC complexes, their experimental operation has shown that the control method is not completely reliable and has a number of drawbacks. The range of control objects is extremely limited – only trolley frames and solid-rolled wheels. Based on this, an urgent scientific and practical task arose to improve the methodology for the diagnosis of non-destructive testing and the software of the IMC complexes, as well as to carry out research aimed at development and implementation of promising non-destructive testing complexes. To solve this problem, the methodological errors of the existing non-destructive testing technique were investigated using five parts. A total of 150 experiments were performed. During these experiments, it was found that the measurement errors are quite large, so the probability of errors of the first and second kind, (i.e. the probability of missing a defect and culling of a good part) is also high. To solve the problem, a method of spectral analysis of the transient process of the part after impact is proposed. This method is quite sensitive and reliable, it is suitable for detecting even minor defects.

### Keywords

nondestructive testing complexes, spectral analysis, flaw detection, intelligent hammer

**For citation**

Kashkovskii V.V., Tikhii I.I., Glinskii I.Yu., Kornilo Yu.A. Issledovanie metodicheskikh pogreshnostei diagnosticheskikh kompleksov nerazrushayushchego kontrolya [Investigation of methodological errors of diagnostic complexes of non-destructive testing]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 102–111. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).102-111.

**Article Info**

Received: June 24, 2022; Received: September 5, 2022; Accepted: September 6, 2022.

**Введение**

Поддержание парка грузовых вагонов в исправном состоянии в процессе грузоперевозок – важная народнохозяйственная задача [1–10]. Большую роль в этом процессе играет инструментальный контроль вагонов. Одним из направлений такого контроля является разработка и создание комплексов неразрушающего контроля. В настоящее время группа компаний Clean Technology Group (CTG) предлагает к поставке две разновидности комплексов для неразрушающего контроля серии «ИМК»: «ИМК-01» и «ИМКмб» (интеллектуальный молоток) [11].

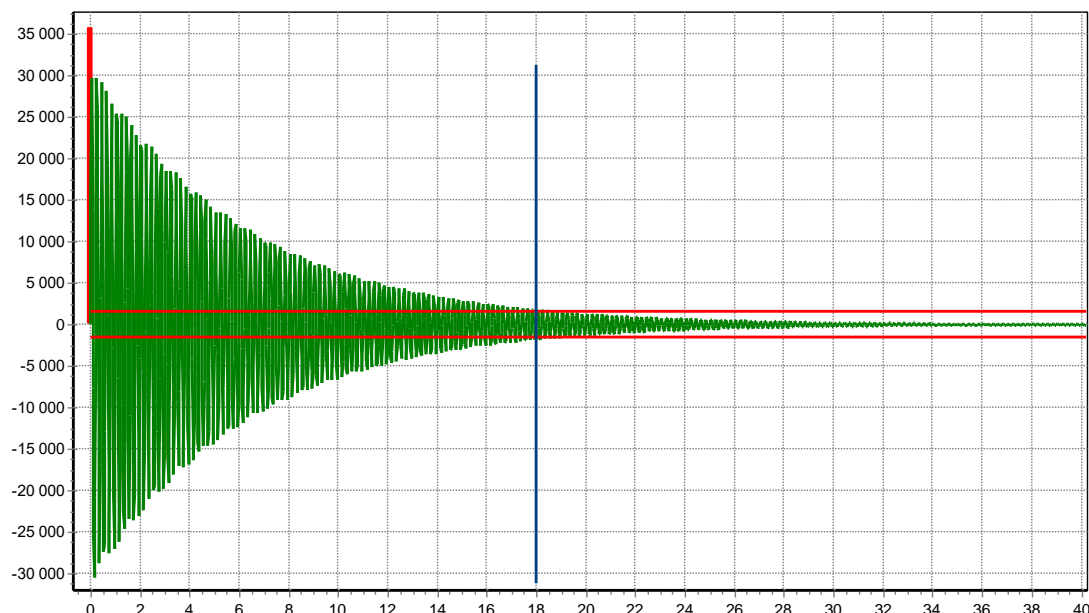
Комплексы неразрушающего контроля серии «ИМК» предназначены для проведения экспресс-контроля боковых рам тележек и цельнокатаных колес грузовых вагонов в составе поезда. Диагностические комплексы производства CTG позволяют проводить интегральную оценку целостности изделий в режиме «дефект / годен» без указания локализации несплошностей в объекте контроля. Похожая методика неразрушающего

контроля рассмотрена в [12].

Несмотря на очевидные плюсы самих комплексов «ИМК», их опытная эксплуатация показала, что метод контроля не вполне надежен и имеет ряд недостатков. Номенклатура объектов контроля крайне ограничена – только рамы тележек и цельнокатаные колеса. Исходя из этого возникла актуальная научно-практическая задача – усовершенствовать методологию диагностики неразрушающего контроля и программное обеспечение комплексов «ИМК», а также выполнить исследования по развитию и внедрению перспективных комплексов неразрушающего контроля.

**Постановка задачи**

В основе комплексов серии «ИМК» используется метод свободных колебаний. Важнейшим свойством используемого метода и его аппаратно-программной реализации является его чувствительность к любым видам структурных изменений (наличие несплошности, дефекта, не-



**Рис. 1.** Весовая функция колебательного звена с параметрами  $\xi = 0,005$  и  $\omega = 5000$  Гц (длительность переходного процесса – 18 мс)

**Fig. 1.** Weight function of an oscillatory link with parameters  $\xi = 0,005$  and  $\omega = 5000$  Hz. (the duration of the transient process is 18 ms)



правильной структуры металла). В основе метода лежит оценка длительности переходного процесса колебательного звена:

$$W(p) = \frac{K\omega^2}{p^2 + 2\xi\omega p + \omega^2},$$

где  $K$  – коэффициент усиления звена;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота собственных незатухающих колебаний звена, рад/с;  $F$  – частота собственных незатухающих колебаний звена, Гц;  $\xi$  – декремент затухания [13–16].

Весовая функция колебательного звена определена выражением:

$$g(t) = \frac{K\omega^2}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega t} \sin\left(\omega\sqrt{1-\xi^2}t\right). \quad (1)$$

При  $0 < \xi < 1$  из (1) очевидно, что чем меньше  $\xi$ , тем длительнее переходный процесс функции  $g(t)$  (рис. 1).

Чтобы получить подобный график для исследуемого объекта, по нему необходимо нанести удар молотком. После этого звуковой сигнал снимается микрофоном и воспроизводится в виде графика переходного процесса. Затем определяется длительность переходного процесса и сравнивается с эталонной. При их несовпадении делается заключение о наличии внутренних дефектов в объекте диагностики (см. рис. 1). Данный метод диагностики имеет следующие методические погрешности:

1. Диагностику технических объектов железной дороги невозможно проводить в полной тишине. Посторонние шумы бесконечны по длительности и не дают возможности найти точку завершения переходного процесса. Для устранения этого недостатка на графике проложены линии верхнего и нижнего предела переходного процесса. Завершением переходного процесса считается точка, в которой колебания становятся меньше допустимого. На рис. 1 эта точка отмечена вертикальной линией, устанавливаемой вручную оператором. Опытным путем верхний и нижний пределы переходного процесса выбраны как  $\pm 5\%$  от диапазона измерения микрофона.

2. Первоначальная амплитуда колебаний переходного процесса определяется силой тестирующего удара, поэтому длительность переходного процесса зависит не только от параметров системы, но и силы удара. Чтобы избежать этой методической погрешности, тестирующий удар в комплексе «ИМК» наносится молотком с электрическим ударником, что гарантирует стабильную силу удара. Однако длительность переходного процесса зависит не только от силы удара, но и от наклона ударного инструмента, загрязнения поверхности, точки нанесения удара по объекту контроля, точки установки микрофона на объекте контроля, расстояния от микрофона до объекта контроля и т.п. Вопрос влияния случай-

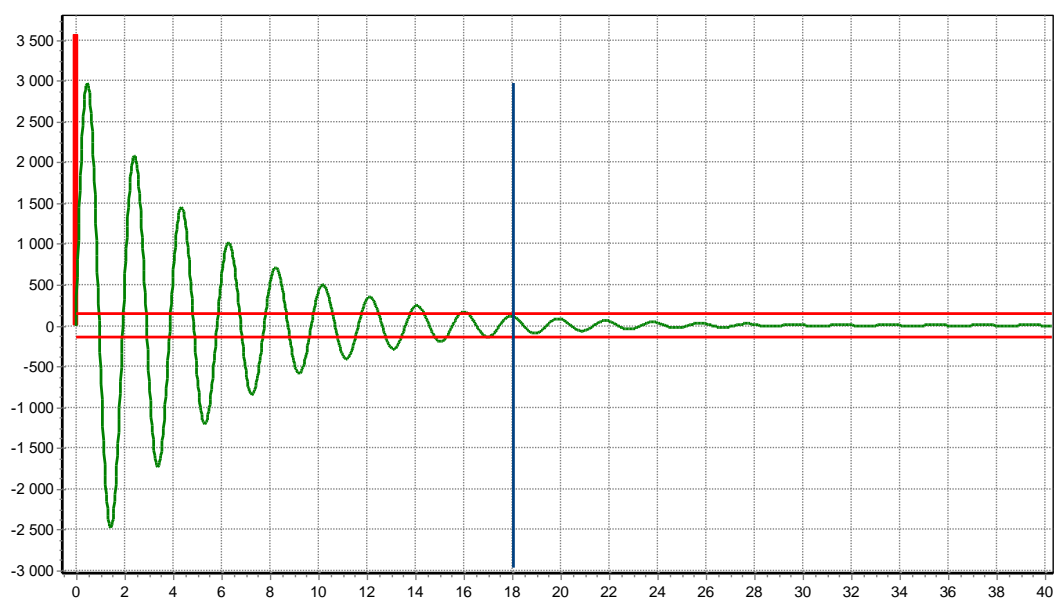


Рис. 2. Весовая функция колебательного звена с параметрами  $\xi = 0,057$  и  $\omega = 515$  Гц (длительность переходного процесса 18 мс)

Fig. 2. Weight function of an oscillatory link with parameters  $\xi = 0,057$  and  $\omega = 5000$  Hz (the duration of the transient process is 18 ms)

ных факторов на точность измерения до настоящего времени не исследован.

3. Длительность переходного процесса зависит не только от декремента затухания  $\xi$ , но и от частоты  $\omega$ , т.е. по длительности переходного процесса невозможно судить об изменении внутренней структуры объекта контроля. Так, на рис. 2 показан пример объекта контроля, имеющий примерно равную длительность переходного процесса с объектом контроля, показанном на рис. 1. Однако параметры  $\xi$  и  $\omega$  этих объектов отличаются почти в 10 раз. Влияние внутренней структуры объекта исследования на длительность переходного процесса до настоящего времени не исследована.

4. На длительность переходного процесса влияют параметры  $\xi$  и  $\omega$ . На рис. 1 и 2 показаны результаты моделирования элементарного колебательного звена. На практике динамическая структура объекта контроля гораздо сложнее и непредсказуема. Методики исследования подобных динамических структур не нашли применения на практике диагностирования технических объектов. На рис. 3 и 4 показан пример измерения длительности переходного процесса опыт-

ного образца объекта контроля.

Исследуемый объект невозможно описать двумя параметрами –  $\xi$  и  $\omega$ . Можно говорить об обобщенном показателе параметра  $\xi$  и нескольких  $\omega$ .

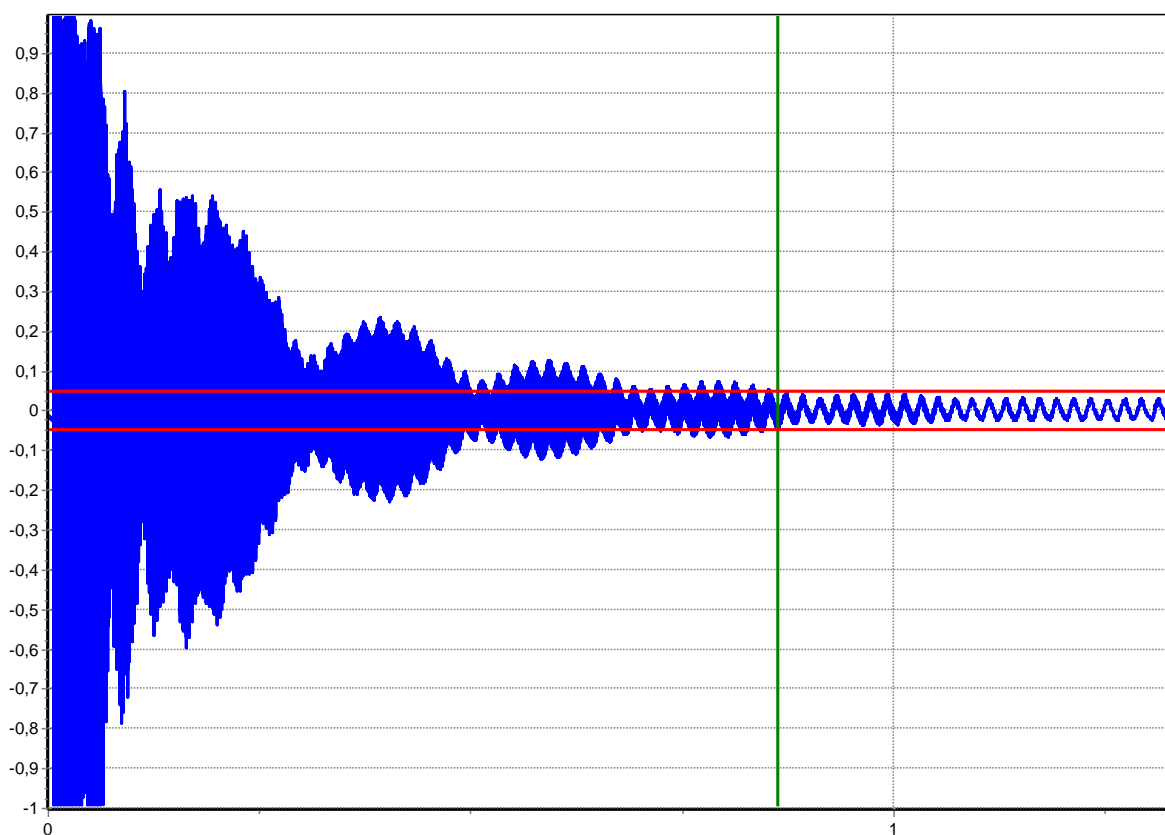
Возникает актуальная практическая задача исследования методических погрешностей существующих принципов неразрушающего контроля.

Для оценки методических погрешностей программного обеспечения комплексов неразрушающего контроля было проведено исследование пяти деталей типа «втулка», одна из которых показана на рис. 5. Геометрические размеры объектов контроля приведены в табл. 1.

При проведении исследований по деталям наносились удары молотком весом 0,3 кг с различными характеристиками (сила удара, направление удара), при этом не допускалось их физическое повреждение. Запись велась на микрофон с частотой дискретизации 44 Гц и разрядностью звука 16 бит.

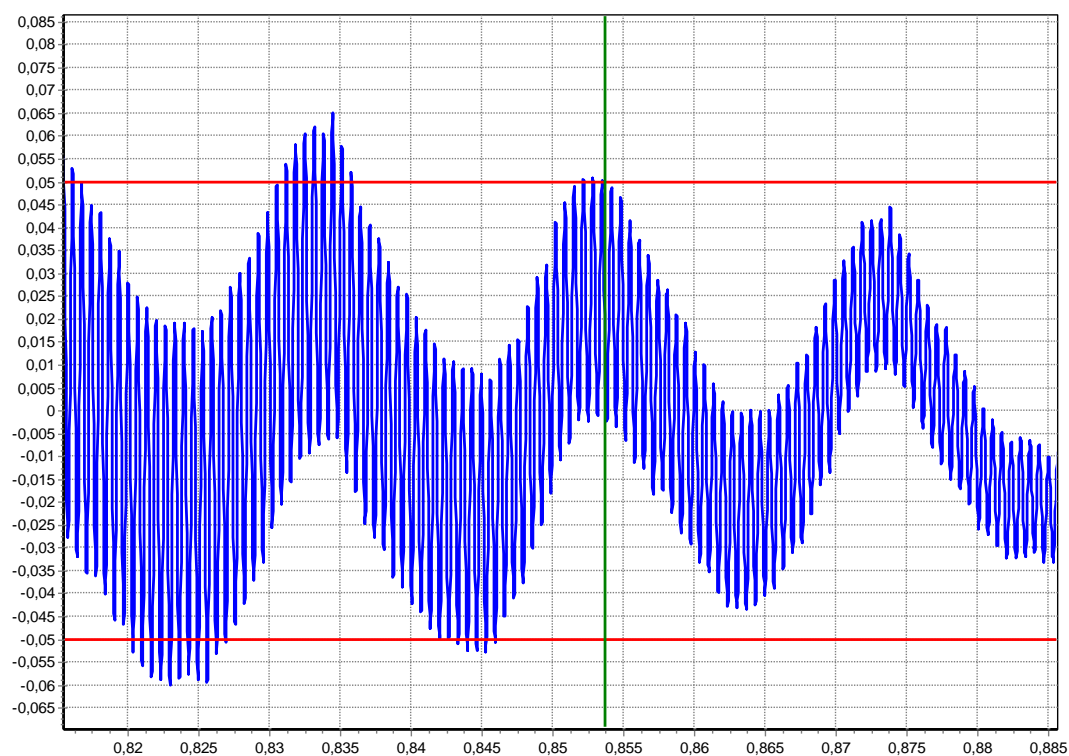
Исследование проводилось в три этапа:

1. Снимались характеристики переходного процесса неповрежденных деталей.



**Рис. 3.** Переходный процесс реального объекта (длительность переходного процесса 0,85 с)

**Fig. 3.** Transient process of a real object (the duration of the transient process is 0,85 s)



**Рис. 4.** Увеличенный участок из рис. 3 в точке измерения переходного процесса  
**Fig. 4.** The enlarged section from fig. 3 at the transient process measurement point



**Рис. 5.** Объект контроля (исследуемая деталь № 001)  
**Fig. 5.** Object of control (test item No. 001)

2. Снимались характеристики тех же деталей, зашлифованных ножовочным полотном.

3. Глубина зашлафовки увеличивалась с помощью угловой шлифовальной машины (болгарки).

На каждом этапе для всех деталей проводилось по десять испытаний ударом молотком с целью оценки статистической погрешности измерения длительности переходного процесса.

**Таблица 1.** Геометрические размеры исследуемых деталей (мм)  
**Table 1.** The geometric dimensions of the researched parts (mm)

Номер детали Item number	Размеры (высота / толщина / диаметр), мм Dimensions (height/thickness/diameter), mm	Материал Material
001	35,7 / 3,3 / 69,8	Сталь
002	31,9 / 3,9 / 101	Сталь
003	50 / 3,9 / 52,2	Сталь
004	47,1 / 10,2 / 63,1	Сталь
008	49,6 / 3,1 / 42,1	Сталь

**Таблица 2.** Оценка длительности переходного процесса  $T_1$  недеформированных деталей  
**Table 2.** Duration estimate of the transient process  $T_1$  of undeformed parts

Деталь Part	$T_{1min}, c$	$T_{1max}, c$	$m_{T_1}^*, c$	$\sigma_{T_1}^*, c$	Относительная погрешность измерения $\pm \frac{\sigma_{T_1}^*}{m_{T_1}^*}, \%$ Relative measurement error
001	0,84	2,52	1,62	0,49	30,0
002	1,36	2,37	1,98	0,15	7,7
003	1,22	1,64	1,35	0,08	6,0
004	1,12	1,98	1,55	0,27	17,0
008	0,60	1,65	0,93	0,25	27,0

Результаты испытаний первого этапа приведены в табл. 2.

На втором этапе замерялась длительность переходного процесса после удара по деформированным деталям. Для деформации была ис-

пользована ножовка по металлу. Размеры надпилов указаны в табл. 3, фотографии деталей – рис. 6. Результаты испытаний второго этапа приведены в табл. 4.

**Таблица 3.** Параметры надпила исследуемых деталей на втором этапе  
**Table 3.** Parameters for notching the studied parts at the second stage

Деталь Part	Глубина реза, мм Cutting depth, mm	Ширина реза, мм Cutting width, mm
001	17	1,5
002	15,1	1,5
003	22	1,5
004	23,2	1,5
008	24,5	1,5



**Рис. 6.** Фотография детали, деформированной ножовкой по металлу  
**Fig. 6.** Photo of a hacksaw deformed part

**Таблица 4.** Оценка длительности переходного процесса деталей  $T_2$ , деформированных при помощи ножовки по металлу**Table 4.** Duration estimate of the transient process  $T_2$  of hacksaw deformed parts

Деталь Part	$T_{2min}, c$	$T_{2max}, c$	$m_{T_2}^*, c$	$\sigma_{T_2}^*, c$	Относительная погрешность измерения Relative measurement error $\pm \frac{\sigma_{T_2}^*}{m_{T_2}^*}$	$m_{T_1}^*, c$	Относительная разница между Relative difference between $\pm \frac{m_{T_2}^* - m_{T_1}^*}{m_{T_2}^*}$
001	0,53	1,66	0,88	0,29	33%	1,62	-46%
002	1,03	2,26	1,58	0,34	22%	1,98	-20%
003	0,58	0,68	0,63	0,03	4%	1,35	-53%
004	1,83	2,52	2,28	0,13	6%	1,55	47%
008	0,56	0,88	0,71	0,08	11%	0,93	-14%

На третьем этапе детали деформировались при помощи угловой шлифовальной машины (болгарки). Размеры надпилов указаны в табл. 5, фотографии деталей, поврежденных болгаркой, показаны на рис. 7. Результаты испытаний третьего этапа приведены в табл. 6.

В рамках данной работы в общей сложности было выполнено 150 испытаний. Экспе-

рименты показали, что в целом существующая методика позволяет отличать годные детали от дефектных. Однако погрешности измерения достаточно большие, поэтому вероятность ошибок первого и второго рода (т.е. вероятность пропуска дефекта и выбраковка годной детали) также велики. Особенно это заметно в случае небольших дефектов.

**Таблица 5.** Параметры надпила исследуемых деталей на втором этапе**Table 5.** Parameters for notching the studied parts at the second stage

Деталь Part	Глубина реза, мм Cutting depth, mm	Ширина реза, мм Cutting width, mm
001	24,5	3,5
002	32	3,5
003	27	3,5
004	44	3,5
008	41	3,5

**Рис. 7.** Фотография детали, деформированной угловой шлифовальной машиной**Fig. 7.** Photograph of an angle grinder deformed part

**Таблица 6.** Оценка длительности переходного процесса деталей  $T_3$ , деформированных болгаркой  
**Table 6.** Duration estimate of the transient process  $T_3$  of angle grinder deformed parts

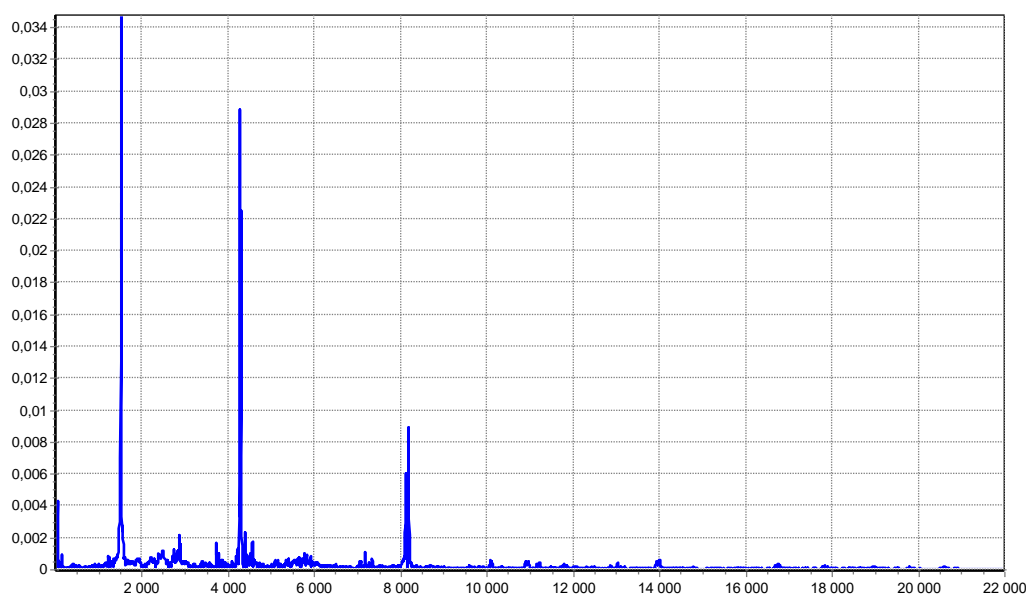
Деталь Part	$T_{3min}, c$	$T_{3max}, c$	$m_{T_3}^*, c$	$\sigma_{T_3}^*, c$	Относительная погрешность измерения Relative measurement error $\pm \frac{\sigma_{T_3}^*}{m_{T_3}^*}, \%$	$m_{T_1}^*, c$	Относительная разница между Relative difference between $\pm \frac{m_{T_3}^* - m_{T_1}^*}{m_{T_1}^*}, \%$
001	1,35	2,0	1,73	0,16	9	1,62	-7
002	0,93	1,24	1,09	0,1	9	1,98	45
003	0,49	0,80	0,7	0,08	11	1,35	-65
004	1,91	3,41	2,51	0,39	16	1,55	62
008	0,33	1,27	0,73	0,18	25	0,93	68

Главный вывод по работе заключается в том, что чувствительность существующего метода недостаточна для практического применения. Именно это объясняет малую номенклатуру объектов, для которых можно использовать комплексы для неразрушающего контроля серии «ИМК». В то же время очевидна насущная необходимость в таких системах. Подобные методы достаточно широко распространены в строительстве [16–18]. Авторы имеют большой опыт в решении подобных задач [18, 19]. Метод решения задачи – спектральный анализ. Из теории колебаний известно, что, зная во времени закон движения масс деформируемой системы (например, боковых рам тележек и цельнокатанных колес грузовых вагонов, втулок, исследованных в данной работе и других деталей), мож-

но дать оценку ее жесткости и прочности. Для дефектоскопии детали необходимо построить спектр ее переходного процесса (рис. 8).

### Заключение

По результатам эксперимента на рис. 8 выявлены пять гармоник с частотами 47,5, 1516, 4273, 8125 и 8190 Гц. Данные гармоники с большой степенью приближения будем считать равными собственным незатухающим колебаниям соответствующего колебательного звена. Исходя из наличия пяти гармоник, можно предположить, что динамическая структура детали 001 состоит, соответственно, из пяти колебательных звеньев. В самом общем виде частоты гармоник собственных незатухающих колебаний исследуемой детали



**Рис. 8.** Спектр переходного процесса детали 001 в исходном состоянии  
**Fig. 8.** Spectrum of the transient process of part 001 in the initial state

можно представить как

$$\omega_i = \sqrt{\frac{c_i}{m}}, \quad (2)$$

где  $\omega_i$  – частота  $i$ -й гармоники собственных незатухающих колебаний исследуемой детали;  $m$  – масса детали;  $c_i$  – коэффициент, характеризующий жесткость детали по  $i$ -й гармонике.

Из (2) следует, что при наличии дефекта

изменяются коэффициенты  $c_i$  и, соответственно, частоты  $\omega_i$ . При значительных дефектах некоторые гармоники могут пропадать и к старым добавляться новые.

Изменение частот гармоник и их числа в спектре делают данный метод достаточно чувствительным и надежным для выявления даже незначительных дефектов.

### Список литературы

1. Об изменении периодичности плановых видов ремонта грузовых вагонов колеи 1520 мм : приказ Министерства путей сообщения РФ от 18.12.1995 г. № 7ЦЗ. М. : МПС РФ, 1995 2 с.
2. О введении новой системы ремонта грузовых вагонов : указание Министерства путей сообщ. Рос. Федерации 5.01.1999 г. № К-2у (Д). М. : МПС РФ, 1999. 2 с.
3. О совершенствовании системы ремонта и технического обслуживания грузовых вагонов : указание Министерства путей сообщения Рос. Федерации от 6.12.1999 г. № К-2746у. М. : МПС РФ, 1999. 2 с.
4. О введении в действие новой редакции правил эксплуатации грузовых вагонов при системе технического обслуживания и ремонта с учетом фактически выполненного объема работ на железных дорогах Российской Федерации : указание Министерства путей сообщения РФ от 17.04.2001 г. № П-671у. М. : МПС РФ, 2001. 17 с.
5. Правила эксплуатации и пономерного учета собственных грузовых вагонов : утв. на 29 заседании Совета по железнодорожному транспорту от 19.06.2001. Введ. 2001–09–01. М., 2001. 13 с.
6. Руководство по капитальному ремонту грузовых вагонов : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества : протокол № 54 от 18-19 мая 2011 г. 136 с.
7. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества : протокол № 57 от 16-17 окт. 2012 г. 17 с.
8. О системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов : распоряжение ОАО «РЖД» от 29 декабря 2012 г. № 2759р. М. : ОАО «РЖД», 2012. 18 с.
9. Об утверждении руководства по текущему отцепочному ремонту (ТР-1) : распоряжение ОАО «РЖД» № 2633/р от 07.12.2018 г. Введ. 2019–01–01. М. : ОАО «РЖД», 2018. 28 с.
10. Интеллектуальный молоток контроля («ИМК») // Clean technologies group : сайт: <https://ctg.su/produkcija/oborudovanie/kompleksy-dlya-vysokodostovernogo-nerazrushayushhego-kontrolya/seriya-imk-intellektualnye-molotki-kontrolya> (Дата обращения: 15.06.2022).
11. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientist and engineers. New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. 831 p.
12. Кочетков Ю.А. Основы автоматизации авиационного оборудования. М. : ВВИА, 1995. 574 с.
13. Муромцев Ю.Л. Основы автоматизации и системы автоматического управления. Ч. 1. Тамбов : Тамб. ГТУ, 2008. 96 с.
14. Серебряков А.С., Семенов Д.А., Чернов Е.А. Автоматика. М. : ЮРАЙТ, 2021. 477 с.
15. NDIS 2421. Recommended practice for in situ monitoring of concrete structures by acoustic emission. The Japanese Society for non-Destructive Inspection (NDIS). 2000.
16. Clough Ray W., Penzien J. Dynamics of Structures. New-York : McGraw-Hill book company, 1975. 320 p.
17. A Proposed Standard for Evaluating Structural Integrity of Reinforced Concrete Beams by Acoustic Emission / Shigenori Yuyama, Takahi&a Okamoto, Miteuhiro ShigeiaM et al. Acoustic emission Standards and Technology Update edited by SJ.Vahaviolos, American Society for Testing and Materials. STP1353. 1999. P. 25–40.
18. Кашковский В.В., Баранов Т.М. Особенности обработки информации автоматизированного деформационного мониторинга мостов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2012. Т. 1. С. 503–510.
19. Кашковский В.В., Устинов. В.В. Система диагностирования и контроля прочностных свойств крыла воздушного судна // Науч. вестн. Моск. гос. техн. ун-та гражд. авиации. 2011. № 172. С. 171–177.

### References

1. Prikaz ministerstva putei soobshcheniya RF ot 18 dekabrya 1995 g. № 7TsZ «Ob izmenenii periodichnosti planovykh vidov remonta gruzovykh vagonov kolei 1520 mm» [Order of the ministry of railways of the Russian Federation No. 7CZ dated December 18, 1995. «On changing the frequency of planned types of repairs of freight wagons of 1520 mm gauge»].
2. Ukazanie Ministerstva putei soobshcheniya RF ot 5.01.1999 g «O vnedrenii novoi sistemy remonta gruzovykh vagonov». [Instruction of the Ministry of railways of the Russian Federation, dated January 5, 1999 no. k-2u (d) «On the introduction of a new system for the repair of freight wagons»].
3. Ukazanie Ministerstva putei soobshcheniya RF ot 6.12.1999 g. no K-2746u «O sovershenstvovanii sistemy remonta i tekhnicheskogo obsluzhivaniya gruzovykh vagonov» [Instruction of the ministry of railways of the Russian Federation dated December 6, 1999, no K-2746u «On improving the system of repair and maintenance of freight wagons»].
4. Ukazanie Ministerstva putei soobshcheniya RF ot 17.04.2001 g. № P-671u «O vvedenii v deistvie novoi redaktsii pravil ekspluatatsii gruzovykh vagonov pri sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta s uchedom fakticheski vy-

полненного объема работ на железных дорогах Российской Федерации» [Instruction of the ministry of railways of the Russian Federation no P-671u, dated April 17, 2001 «On the introduction of a new edition of the rules for the operation of freight wagons in the maintenance and repair system, taking into account the amount of work actually performed on the railways of the Russian Federation»].

5. Правила эксплуатации и полнормного учета собственных грузовых вагонов. Утверждены на 29 заседании Совета по железнодорожному транспорту. Дата введения в действие: 01.09.2001 г. [Rules of operation and measurement of own freight wagons. Approved for the 29th meeting of the Railway Transport Council. Effective date: September 01, 2001].

6. «Руководство по капитальному ремонту грузовых вагонов». Утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол № 54 от «18-19» мая 2011 г. [Manual for the overhaul of freight cars. Approved by: The Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol No. 54 of May 18-19, 2011], 136 p.

7. Положения о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении. Утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества Протокол № 57 от «16-17» октября 2012 г. [Regulations on the system of maintenance and repair of freight cars admitted to circulation on public railways in international traffic. Approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States Protocol No. 57 of October 16-17, 2012].

8. Распоряжение ОАО «РЖД» от 29 декабря 2012 г. № 2759р «О системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов» [Order of the JSC «Russian Railways» No. 2759r dated December 29, 2012 «On the system of maintenance and repair of freight wagons»].

9. Распоряжение ОАО «РЖД» N 2633/р от 07.12.2018 г «Об утверждении руководства по текущему отсечному ремонту (TR-1)». [Order of JSC «Russian Railways» no 2633/r dated December 07, 2018 «Manual for current uncoupling repair (TR-1)»].

10. Clean technologies group (Elektronnyi resurs) [Clean technologies group (Electronic resource)]. Available at: <https://ctg.su/produkcija/oborudovanie/kompleksy-dlya-vysokodostovernogo-nerazrushayushhego-kontrolya/seriya-imk-intellektualnye-molotki-kontrolya> (Accessed 15.06.2022).

11. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientist and engineers. New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. 831 p.

12. Kochetkov Yu.A. Osnovy avtomatiki aviatsionnogo oborudovaniya [Fundamentals of aviation equipment automation]. Moscow: VVIA Publ., 1995. 574 p.

13. Muromtsev Yu.L. Osnovy avtomatiki i sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Fundamentals of automation and automatic control systems]. Part 1. Tambov: Tambov, 2008. 96 p.

14. Serebryakov A.S., Semenov D.A., Chernov E.A. Avtomatika [Automation]. Moscow: URAIT Publ., 2021. 477 p.

15. NDIS 2421. Recommended practice for in situ monitoring of concrete structures by acoustic emission. The Japanese Society for non-Destructive Inspection (NDIS). 2000.

16. Clough Ray W., Penzien J. Dynamics of Structures. New-York : McGraw-Hill book company, 1975. 320 p.

17. Shigenori Yuyama, Takahi&a Okamoto, Miteuhiro ShigeiaM et al. A Proposed Standard for Evaluating Structural Integrity of Reinforced Concrete Beams by Acoustic Emission. *Acoustic emission Standards and Technology Update edited by S.J.Vahaviolos, American Society for Testing and Materials*. STP1353, 1999. pp. 25–40.

18. Kashkovskii V.V., Baranov T.M. Osobennosti obrabotki informatsii avtomatizirovannogo deformatsionnogo monitoringa mostov [Features of processing information of automated deformation monitoring of bridges]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2012, vol. 1, pp. 503–510.

19. Kashkovskii V.V., Ustinov. V.V. Sistema diagnostirovaniya i kontrolya prochnostnykh svoystv kryla vozдушного судна [The system for diagnosing and monitoring the strength properties of an aircraft wing]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii* [Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation], 2011, no. 172, pp. 171–177.

### Информация об авторах

**Кашковский Виктор Владимирович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, доцент, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: viktor.kashkovskij@mail.ru.

**Тихий Иван Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: tiviv@list.ru.

**Глинский Игорь Юрьевич**, магистрант кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: ig.1906@yandex.ru.

**Корнило Юлия Александровна**, кафедра информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kornilo.00@mail.ru.

### Information about the authors

**Victor V. Kashkovskii**, Doctor of Engineering Science, Senior Researcher, Associate Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: viktor.kashkovskij@mail.ru.

**Ivan I. Tikhii**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Physics, mechanics and instrument engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: tiviv@list.ru.

**Igor Yu. Glinskii**, Master Student of the Department of Information systems and information security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: ig.1906@yandex.ru.

**Yuliya A. Kornilo**, Department of Information systems and information security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kornilo.00@mail.ru.



## Анализ качества трехфазного напряжения и тока в цепях асинхронных вспомогательных машин электровоза

В.В. Немкина✉

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

✉nemykinavv@mail.ru

### Резюме

Формирование трехфазного напряжения необходимо для работы асинхронных вспомогательных машин электровоза. В настоящее время трехфазное напряжение промышленной частоты формируется из однофазного напряжения при помощи системы преобразования числа фаз. Данная система состоит из симметрирующих конденсаторов и резисторов. В работе произведен анализ системы преобразования числа фаз, применяемой в современном период. Исследование системы выявило наличие амплитудной и угловой несимметрии токов и напряжений. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности на обмотках статора и коэффициент несимметрии тока по обратной последовательности при работе трех асинхронных вспомогательных машин значительно увеличиваются относительно допустимых значений по условию безотказной работы электродвигателей. Анализ несимметрии токов и напряжений в обмотках статора асинхронных двигателей вспомогательных машин электровозов выполнялся в среде Simulink математической программы Matlab. Исследование проводилось при напряжении контактной сети, питающей электровоз, равном 25 000 В и трех работающих асинхронных вспомогательных машинах. Расчеты выполнялись методом симметричных составляющих, который базируется на теории многофазных электрических систем при неодинаковых условиях работы фаз. Для каждой из систем последовательностей напряжений и токов электромагнитные процессы в фазах подобны, что позволяет воспользоваться однолинейными схемами для каждой последовательности и выполнить расчеты с оценкой качества напряжения и тока в трех фазах.

### Ключевые слова

асинхронные вспомогательные машины, несимметрия токов и напряжений, система преобразования числа фаз, симметрирующие конденсаторы, коэффициенты несимметрии

### Для цитирования

Немкина В.В. Анализ качества трехфазного напряжения и тока в цепях асинхронных вспомогательных машин электровоза / В.В. Немкина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 112–119. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).112-119.

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.08.2022 г.; поступила после рецензирования: 12.09.2022 г.; принята к публикации: 13.09.2022 г.

## Quality analysis of currents and voltages in circuits of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives

V.V. Nemykina✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉nemykinavv@mail.ru

### Abstract

The formation of a three-phase voltage is necessary for the operation of asynchronous auxiliary machines of an electric locomotive. At present, a three-phase voltage is formed at an industrial frequency from a single-phase voltage using a phase number conversion system. The phase number conversion system consists of balancing capacitors and resistors. In this paper, an analysis is made of the phase number converting system currently in use. The study of the system revealed the presence of amplitude and angular asymmetry of currents and voltages. The voltage asymmetry coefficient in the negative sequence on the stator windings and the current asymmetry coefficient in the negative sequence during the operation of three asynchronous auxiliary machines significantly increase relative to the allowed values under the condition of the failure-free operation of electric motors. The study of the currents and voltages asymmetry in the stator windings of asynchronous motors of locomotive auxiliary machines was carried out in the Simulink environment of the mathematical program «Mathlab». The study was carried out at a voltage of the contact network supplying an electric locomotive of 25 000 V and three operating asynchronous auxiliary machines. The calculations were performed by the method of symmetrical components based on the theory of multi-phase electrical systems under different operating conditions of the phases. For each of the systems of voltage and current sequences, the electromagnetic processes in the phases are similar, which makes it possible to use single-line diagrams for each sequence and perform calculations with an assessment of the quality of voltage and current in three phases.

**Keywords**

auxiliary machines, unbalance of currents and voltages, phase conversion system, balancing capacitors, asynchronous auxiliary machines

**For citation**

Nemykina V.V. Analiz kachestva trekhfaznogo napryazheniya i toka v tsepyakh asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin el-ektrovoza [Quality analysis of currents and voltages in circuits of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 112–119. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).112-119.

**Article info**

Received: August 12, 2022; Revised: September 12, 2022; Accepted: September 13, 2022.

**Введение**

Деятельность железнодорожного транспорта в современных условиях имеет свои особенности, которые, в свою очередь, влияют на условия эксплуатации поездов, техническое состояние подвижного состава, безопасность перевозочного процесса и, в целом, на национальную экономику [1].

В настоящее время основной задачей для ОАО «РЖД» является повышение безопасности и надежности тягового подвижного состава во время его эксплуатации. В рамках ее решения сформирована стратегия развития РЖД на период до 2030 г. Утвержденные стратегические инициативы реализуют инновационный путь развития на основе разработки и внедрения технических и технологических решений с наибольшим экономическим эффектом, путем внедрения современных разработок в научно-исследовательских, проектно-конструкторских организациях, на машиностроительных заводах и на сети железных дорог. Для совершенствования технологии электрической тяги поездов необходима модернизация или замена существующего оборудования. Только путем устранения причины неудовлетворительной работы современного оборудования, применяемого на железной дороге, можно повысить производительность и обеспечить энергетическую эффективность электрической тяги поездов [2].

**Постановка задач исследования**

Для привода вспомогательных машин электровозов переменного и постоянного тока применяются асинхронные трехфазные электродвигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора мощностью порядка 0,75–55 кВт. Для экономии электроэнергии и улучшения условий эксплуатации изоляции тягового оборудования заводы стали изготавливать непосредственные преобразователи частоты и числа фаз (ПЧФ) из однофазного напряжения частотой 50 Гц в

трехфазное напряжение частотой 162/3 Гц при управлении производительностью вентиляторов системы охлаждения. На электровозах постоянного тока ранее применялись делители напряжения с использованием секций пуско-тормозных сопротивлений и преобразователей частоты.

На вспомогательное оборудование электровоза действуют сложные условия работы, которые при питании от сети однофазного переменного тока оказывают значительное влияние на надежность и долговечность его использования [3–5]. Высшие гармоники тока создают временные гармоники магнитодвижущей силы, частота которых в пространстве пропорциональна частоте гармоники, т. е. в несколько раз больше частоты вращения основного поля [6–8].

Широкое распространение электровозов переменного тока на сети железных дорог России определяет актуальность работ, направленных на повышение энергетической эффективности, надежности вспомогательных машин электроподвижного состава. Особая роль связана с обеспечением работоспособности электровоза [9–11].

Для привода вспомогательных машин на современном электроподвижном составе переменного тока применяют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Практика показывает, что 20 % отказов на электровозах переменного тока происходит по причине повреждения вспомогательных машин, что во многом обусловлено несовершенством системы их питания. Значительный поток отказов вспомогательных асинхронных двигателей, а также недостатки существующих систем питания таких двигателей обуславливают высокую актуальность исследований, направленных на повышение надежности вспомогательных машин.

Привод вспомогательных машин электровозов переменного и постоянного тока приводят в действие асинхронные трехфазные электро-

двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора мощностью порядка 0,75–55 кВт [11].

### Методика исследования

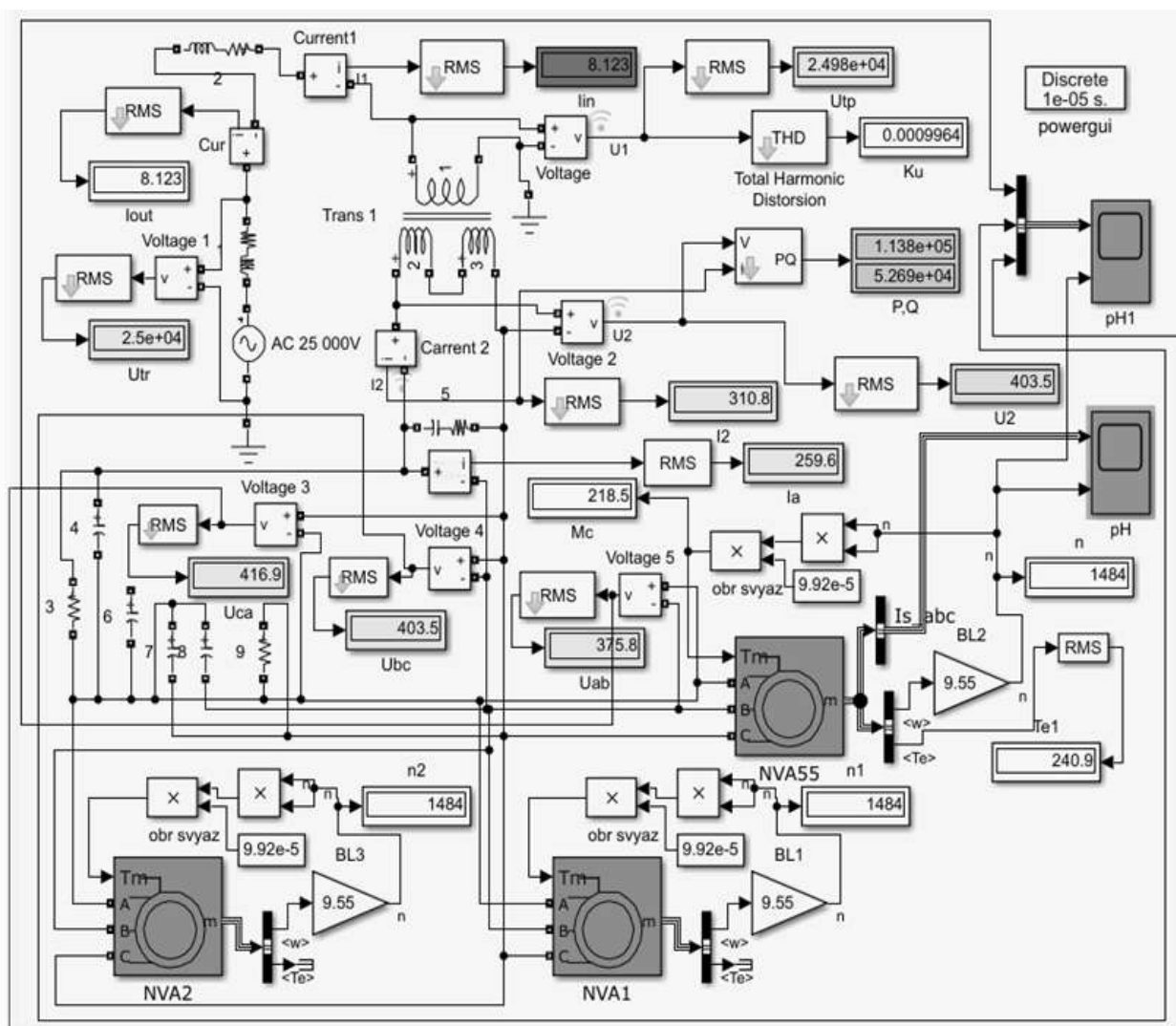
Принцип работы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором состоит в том, что при подключении фазных статорных обмоток к сети по обмоткам будут протекать токи, сдвинутые между собой на угол  $120^\circ$ . Возникающие при этом магнитные поля фазных обмоток статора будут, как и токи, изменяться со сдвигом по фазе относительно друг друга на угол  $120^\circ$  [12, 13].

На электровазах однофазного переменного тока пуск трехфазных асинхронных вспомо-

гательных машин (АВМ) выполняется путем формирования трехфазного напряжения частотой 50 Гц с применением симметрирующих конденсаторов и резисторов системы преобразования числа фаз (СПЧФ) [14, 15].

С выходом работы электродвигателей на устойчивую ветвь механической характеристики при линейном напряжении порядка 300 В симметрирующие устройства отключаются от обмоток статора, а функцию СПЧФ выполняют работающие под нагрузкой ориентировочно 0,6-Рн асинхронные машины с завышенным скольжением [16–18].

Система преобразования числа фаз формирует несимметричные трехфазные токи и

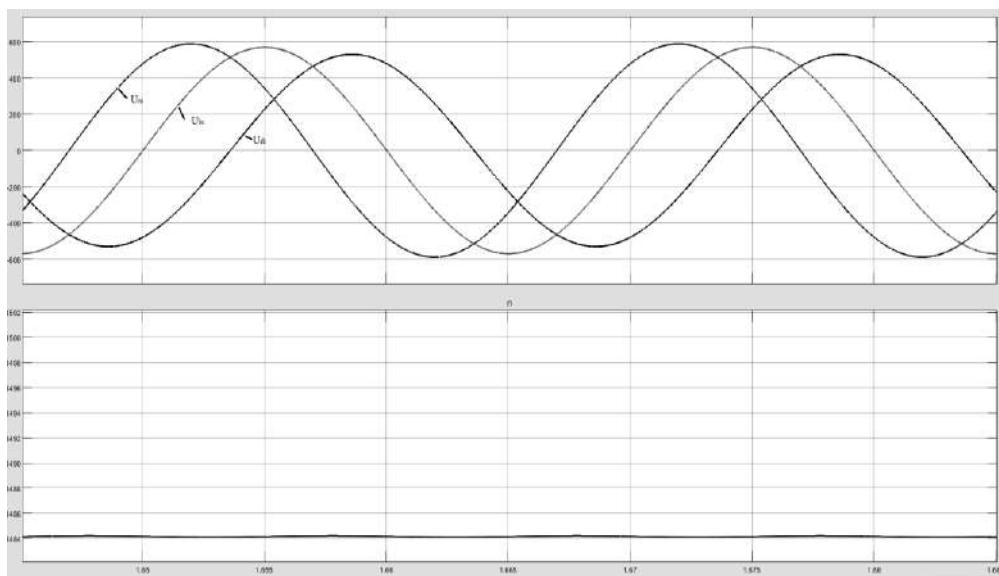


**Рис. 1.** Математическая модель электропривода вспомогательных машин с учетом влияния на его работу выпрямительно-инверторного преобразователя тягового привода электроваза с номинальной нагрузкой

**Fig. 1.** Mathematical model of the electric drive of auxiliary machines, taking into account the influence on its operation of the rectifier-inverter converter of the traction drive of an electric locomotive with a rated load

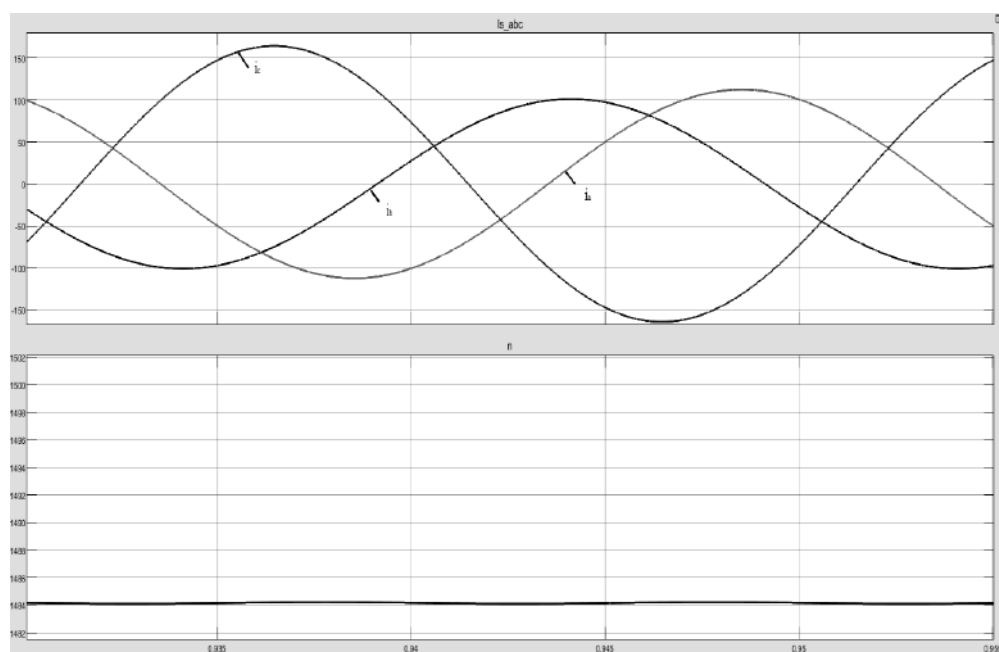
напряжения в обмотках статора АВМ, и работа выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) тяговых электродвигателей (ТЭД) электровазона вносит дополнительные нелинейные искажения трехфазных токов и напряжений в электрических цепях вспомогательных машин электровазона [19, 20].

Негативное влияние несимметричных трехфазных токов и напряжений на работу АВМ с учетом нелинейных искажений исследовано при помощи математического моделирования электромагнитных процессов в программе Matlab в среде Simulink (рис. 1) и при помощи метода симметричных составляющих.



**Рис. 2.** Линейные напряжения в обмотках статора трех асинхронных вспомогательных машин во время работы в четвертой зоне выпрямительно-инверторного преобразователя тягового электропривода электровазона

**Fig. 2.** Linear voltages in the stator windings of three asynchronous auxiliary machines during operation in the fourth zone of the rectifier-inverter converter of the locomotive's traction electric drive



**Рис. 3.** Фазные токи в обмотках статора трех асинхронных вспомогательных машин во время работы в четвертой зоне выпрямительно-инверторного преобразователя тягового электропривода электровазона

**Fig. 3.** Phase currents in the stator windings of three asynchronous auxiliary machines during operation in the fourth zone of the rectifier-inverter converter of the locomotive's traction electric drive

Для исследования асинхронных двигателей широко применяется метод симметричных составляющих с использованием принципа наложения. Токи фаз раскладываются на составляющие, создающие круговые вращающиеся магнитные поля.

Исследование работы электропривода выполнено при напряжении в контактной сети 25 кВ при трех работающих АВМ, в четвертой зоне работы ВИП с номинальной нагрузкой на валу ТЭД. С помощью осциллографа рН\_У получены осциллограммы линейных напряжений на выходе СПЧФ, фазных токов в трехфазных обмотках статора асинхронного двигателя и частоты вращения вала  $n$  в установившемся режиме работы.

Метод симметричных составляющих базируется на теории многофазных электрических систем при неодинаковых условиях работы фаз. Математическое обоснование метода было разработано французским ученым К. Фортескью. Суть метода заключается в том, что любая система из трех несимметричных векторов имеет шесть степеней свободы. Несимметричную систему из трех векторов можно представить в виде трех симметричных систем, каждая из которых имеет две степени свободы. Исходя из физической картины явлений в электрических системах используют три симметричных системы: прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для каждой из них явления в фазах подобны, что позволяет воспользоваться однолинейными схемами для каждой последовательности и вести расчет для одной фазы. Такая фаза находится в условиях, отличающихся от условий для двух других фаз, и называется особой фазой. В этом заключается одно из главных достоинств метода симметричных составляющих [21–23].

Комплекс напряжения системы нулевой последовательности определяется по формуле:

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_{ab} + \dot{U}_{bc} + \dot{U}_{ca}) \quad (1)$$

где  $\dot{U}_{ab}$ ,  $\dot{U}_{bc}$ ,  $\dot{U}_{ca}$  – комплексы действующих линейных напряжений.

Комплекс напряжения системы прямой последовательности:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_{ab} + a \cdot \dot{U}_{bc} + a^2 \cdot \dot{U}_{ca}) \quad (2)$$

где  $a$  – оператор поворота вектора на угол  $2\pi/3$  против часовой стрелки;  $a^2$  – оператор поворота вектора на угол  $2\pi/3$  по часовой стрелке.

Комплекс напряжения системы обратной последовательности:

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_{ab} + a^2 \cdot \dot{U}_{bc} + a \cdot \dot{U}_{ca}) \quad (3)$$

Под действием напряжений систем, прямой и обратной последовательности в обмотках статора асинхронного двигателя с учетом активно-индуктивного сопротивления обмоток и направления вращения ротора формируются системы токов, прямой и обратной последовательности [24–26]. Расчеты систем токов выполняются по формулам, подобным выражениям (1)–(3).

Результаты расчета комплексных напряжений, токов системы прямой и обратной последовательности по формулам (1)–(3):

$$\dot{U}_1 = 263,71 e^{j-60,7} \text{ В};$$

$$\dot{U}_2 = 130,95 e^{j-4,9} \text{ В};$$

$$\dot{I}_1 = 85,49 e^{j1} \text{ А}; \quad \dot{I}_2 = 30,73 e^{j-22,8} \text{ А}.$$

На основании полученных значений вычислены коэффициенты несимметрии по обратной последовательности токов и напряжений. Коэффициенты несимметрии напряжений и токов по обратной последовательности  $K_{2U}$ ,  $K_{2I}$  и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения  $K_U$  [13]:  $K_{2U} = 49,66 \%$ ,  $K_{2I} = 35,94 \%$ ,  $K_U = 0,1$ .

Из представленных результатов видно, что при работе трех АВМ коэффициенты несимметрии токов и напряжений по обратной последовательности значительно превышают допустимые нормы, что обусловлено работой силового трансформатора, ВИП, а также нагрузкой ТЭД электровоза [27–30]. С помощью тиристоров переключается число витков вторичной обмотки, следовательно, число витков вторичной тяговой обмотки при работе ВИП в четвертой зоне регулирования увеличивается, поэтому усиливается электромагнитная связь секций вторичной тяговой обмотки с обмоткой собственных нужд преобразовательного тягового трансформатора электровоза [31–33].

## Заключение

Из результатов исследования следует, что показатели качества электрической энергии в трехфазных электрических цепях электровоза однофазного переменного напряжения зависят от уровня напряжения в контактной сети, количе-

ства работающих АВМ и от режима работы ВИП тягового электропривода электровоза [34–36].

Коэффициент несимметрии напряжений и токов по обратной последовательности составляет  $K_{2U} = 49,66\%$ ,  $K_{2I} = 35,94\%$  при номинальном напряжении на токоприемнике, при работе ВИП тягового электропривода в четвертой зоне регулирования и во время работы трех АВМ.

Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности на обмотках статора трех АВМ увеличивается на  $45,66\%$ , а коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности – на  $31,31\%$  относительно допустимых величин по условию безотказной

работы электродвигателей. Показатели качества электроэнергии получены при суммарном коэффициенте гармонических составляющих напряжения  $K_U = 0,1$ .

Для устранения недостатков систем преобразования числа фаз, которые эксплуатируются и изготавливаются в настоящее время для обеспечения работы трехфазных АВМ на электровозах переменного тока, целесообразно использовать в дальнейших технических решениях разработанную в Иркутском государственном университете путей сообщения теорию энергетических процессов и выполнить исследование.

### Список литературы

1. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К) : руководство по эксплуатации. В 2 т. Новочеркасск : Новочеркасский электровозостроительный завод, 2007.
2. Стратегия научно-технологического развития холдинга "РЖД" на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17.04.2018 № 769/р. URL: [http://www.rzd-expro.ru/innovation/sait\\_WB.pdf](http://www.rzd-expro.ru/innovation/sait_WB.pdf) (дата обращения 18.06.2022).
3. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М. : Стандартинформ, 2014. 15 с.
4. Причина снижения эффективности преобразования электрической энергии и электромагнитной совместимости элементов в электротехническом комплексе / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, Н.М. Астраханцева и др. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2013. Т. 2. С. 370–376.
5. Литовченко В.В. 4gS четырехквadrантный преобразователь электровазов переменного тока // Изв. вузов. Электромеханика. 2000. № 3. С. 64–73.
6. Маевский О.А. Энергетические характеристики вентильных преобразователей. М. : Энергия, 1978. 320 с.
7. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. СПб. : Питер, 2009. Т. 2. 431 с.
8. Уточненный закон сохранения энергии / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, К.П. Якобчук и др. // rusnauka.com : сайт. URL:[http://www.rusnauka.com/42\\_PRNT\\_2015/Tecnic/5\\_202603.doc.html](http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.html) (дата обращения 10.08.2022).
9. Родштейн Л.А. Электрические аппараты. Л. : Энергоатомиздат, 1989. 368 с.
10. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил и др. М. : Энергоатомиздат, 1989. 528 с.
11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М. : Высшая школа, 1978. 528 с.
12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1973. 831 с.
13. ГОСТ 30804.4.7-2013. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. 2014-01-01. М. : Стандартинформ, 2013. 38 с.
14. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. М. : Транспорт, 1980. 470 с.
15. Тихменев Б.Н. Электровазы переменного тока со статическими преобразователями. М. : Транспорт, 1958. 277 с.
16. Energy-saving driving of heavy trains / N. Ryabchenok, T. Alekseeva, L. Astrakhancev et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. P. 491–508.
17. Parallel operation of an inverter with an electrical ac network / Alekseeva T.L., Ryabchyonok N.L., Astrakhantsev L.A. et al. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. С. 012003. DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012003.
18. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У. Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Ландгрэн и др. М. : Интекст, 2002. 408 с.
19. Осипов С.И., Осипов С.С. Теория электрической тяги. М. : УМК МПС РФ, 2000. 592 с.
20. Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Алексеев А.С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть – электроваз» // Электричество. 2002. № 2. С. 29–35.
21. Михальчук Н.Л., Макаров В.В. Электромагнитная совместимость электровазов однофазно-постоянного тока и электроснабжения общего назначения // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IV всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2013. Т. 2. С. 384–392.
22. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. Т. 2. 307 с.
23. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровазы переменного тока с тиристорными преобразователями. М. : Транспорт, 1988. 310 с.
24. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М. : Высшая школа, 1996. 638 с.
25. Засорин С.Н., Мицкевич В.А., Кучма К.Г. Электронная и преобразовательная техника. М. : Транспорт, 1981. 319 с.

26. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентиляльных преобразователей. Новосибирск : НГУ, 1990. 219 с.
27. Бадер М.П. Повышение эффективности тягового электроснабжения постоянного тока и обеспечение электромагнитной совместимости // Электроснабжение и водоподготовка. 2000. № 2. С. 62–66.28.
28. Jennela S., Raj Kumar V. THD Analysis of One-Cycle and PWM Controlled Active Power Filters // Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES. Springer, 2014. P. 225–236.
29. Mohanraj K., Danya Bersis C., Sekhar S. Simulation of Open Loop and Feed-Back Controlled Bridgeless PFC Boost Converter // Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES. Springer, 2014. P. 29–38.
30. Prasuna P.V., Rama Rao J.V.G., Lakshmi Ch.M. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). 2013. Vol. 2 (4). P. 2368–3376.
31. Алексеева Т.Л., Рябченко Н.Л. Энергосберегающее использование электрической энергии // Universum: Технические науки. 2016. № 11 (32). С. 25–30.
32. Alekseeva T., Ryabchyonok N., Astrakhansev L. Technology of Electric Power Efficient Use in Transport // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT. Voronezh, 2017. P. 120–133.
33. 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.
34. Астраханцев Л.А., Асташков Н.П. Обоснование метода построения автоматизированной системы управления производительностью мотор-вентиляторов на электровозах // Вестн. Иркутск. гос. техн. ун-та. 2012. № 3 (62). С. 90–95.
35. Повышение электромагнитной совместимости подвижного состава / Л.А. Астраханцев, Н.П. Асташков, Н.Л. Рябченко и др. // Безопасность регионов – основа устойчивого развития. 2012. Т. 1-2. С. 92–94.
36. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. М : Маршрут, 2005. 446 с.

### References

1. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K): Rukovodstvo po ekspluatatsii (v 2 t.) [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K): Operation manual (in 2 vol.)]. Novocherkassk: Novocherkasskii elektrovozostroitel'nyi zavod Publ., 2007.
2. Belaya kniga OAO «RZhD» №769/r ot 17.04.2018 «Strategiya nauchno-tekhnicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda» [The White Paper of JSC «Russian Railways» No. 769/r dated 17.04.2018 «Strategy of scientific and technical development of the holding «Russian Railways» for the period up to 2025 and for the future up to 2030»].
3. GOST 32144-2013. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [State standard 32144-2013. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 15 p.
4. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhanseva N.M., Ryabchenok K.P., Astrakhansev L.A., Bairasakhan G. Prichina snizheniya effektivnosti preobrazovaniya elektricheskoi energii i elektromagnitnoi sovmestimosti elementov v elektrotekhnicheskoy komplekse [The reason for the decrease in the efficiency of conversion of electrical energy and electromagnetic compatibility of elements in the electrical complex]. *Materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Proceedings of IV All-Russian scientific-practical conference with international participation «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2013, vol. 2, pp. 370–376.
5. Litovchenko V.V. 4gS chetyrekhkvadrantnyi preobrazovatel' elektrovozov peremennogo toka [4gS four-quadrant converter of electric locomotives current]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Bulletins of high educational organizations. Electromechanics], 2000, no. 3, pp. 64–73.
6. Maevskii O.A. Energeticheskie kharakteristiki ventil'nykh preobrazovatelei [Energy Characteristics of Valve Converters]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 320 p.
7. Demirchan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical Bases of an Electrical Engineering]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2009, vol. 2, 431 p.
8. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Yakobchuk K.P., Astrakhansev 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 August 10, 2022).
9. Rodstein L.A. Elektricheskie apparaty [Electrical apparatus]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1989. 368 p.
10. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. Osnovy teorii tsepei [Fundamentals of the theory of chains]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989. 528 p.
11. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1978. 528 p.
12. Korn Granino A., Korn Theresa M. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical handbook for scientists and engineers. Definitions, theorems and formulas for reference and review]. Moscow: Nauka Publ., 1973. 831 p.
13. GOST 30804.4.7-2013. Obshchee rukovodstvo po sredstvam izmerenii i izmereniyam garmonik i intergarmonik dlya sistem elektrosnabzheniya i podklyuchaemykh k nim tekhnicheskikh sredstv [State Standart 30804.4.7-2013. General guide to measuring instruments and measurements of harmonics and interharmonics for power supply systems and technical means connected to them]. Moscow: Standartinform Publ., 2013. 38 p.
14. Tikhmenev B.N., Trakhtman L.M. Podvizhnoi sostav elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. Teoriya raboty elektrooborudovaniya. Elektricheskie skhemy i apparaty [Rolling stock of electrified railways. Theory of electrical equipment. Electrical circuits and devices]. Moscow: Transport, 1980. 470 p.

15. Tikhmenev B.N. Elektrovozy peremennogo toka so staticheskimi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with static converters]. Moscow: Transport Publ., 1958. 277 p.
16. Ryabchenok N., Alekseeva T., Astrakhancev L. et al. Energy-saving driving of heavy trains. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 982, pp. 491–508.
17. Alekseeva T.L., Ryabchyonok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Astashkov N.P., Martusov A.L., Alekseev M.E. Parallel operation of an inverter with an electrical ac network. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019*, 2020, P. 012003
18. Harris W.J., Zakharov S.M., Lundgren J., Tournay H., Ebersohn W. Obobshchenie peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeistviya koleasa i rel'sa [Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail]. Moscow: Intekst Publ., 2002. 408 p.
19. Osipov S.I., Osipov S.S. Teoriya elektricheskoi tyagi [Theory of electric traction]. Moscow: UMK MPS RF Publ., 2000. 592 p.
20. Savos'kin A.N., Kulnich Yu.M., Alekseev A.S. Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v dinamicheskoi sisteme «kontaktnaya set' – elektrovoz» [Mathematical modeling of electromagnetic processes in the dynamic system «contact network - electric locomotive»]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2002, no. 2, pp. 29–35.
21. Mikhaltchuk N.L., Makarov V.V. Elektromagnitnaya sovместimost' elektrovozov odnofazno-postoyannogo toka i elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electromagnetic compatibility of single-phase direct current electric locomotives and general-purpose power supply]. *Materialy IV vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Proceedings of IV All-Russian scientific-practical conference with international participation «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2013, vol. 2, pp. 384–392.
22. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and Converter Technology]. Moscow: UMST ZHDT Publ., 2015. Vol. 2. 307 p.
23. Tikhmenev B.N., Kuchumov V.A. Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [Alternating current electric locomotives with thyristor converters]. Moscow: Transport Publ., 1988. 310 p.
24. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1996. 638 p.
25. Zasorin S.N., Mitskevich V.A., Kuchma K.G. Elektronnaya i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronic and converter technology]. Moscow: Transport Publ., 1981. 319 p.
26. Zinov'ev G.S. Pryamye metody rascheta energeticheskikh pokazatelei ventil'nykh preobrazovatelei [Direct methods for calculating the energy performance of valve converters]. Novosibirsk: NGU Publ., 1990. 219 p.
27. Bader M.P. Povyshenie effektivnosti tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka i obespechenie elektromagnitnoi sovместimosti [Increasing the efficiency of direct current traction power supply and ensuring electromagnetic compatibility]. *Elektrosnabzhenie i vodopodgotovka* [Power supply and water treatment], 2000, no. 2, pp. 62–66.
28. Jennela S., Raj Kumar V. THD Analysis of One-Cycle and PWMControlled Active Power Filters. *Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES*. Springer, 2014, pp. 225–236.
29. Mohanraj K., Danya Bersis C., Sekhar S. Simulation of Open Loop and Feed-BackControlled Bridgeless PFC BoostConverter. *Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES*. Springer, 2014, pp. 29–38.
30. Prasuna P.V., Rama Rao J.V.G., Lakshmi Ch.M. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJE-RA)*, 2013, vol. 2 (4), pp. 2368–3376.
31. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L. Energosberegayushchee ispol'zovanie elektricheskoi energii [Energy-saving use of electrical energy]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: Technical sciences], 2016, no. 11 (32), pp. 25–30.
32. Alekseeva T., Ryabchyonok N., Astrakhantsev L. Technology of Electric Power Efficient Use in Transport. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT*, 2017, pp. 120–133.
33. 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.
34. Astrakhantsev L.A., Astashkov N.P. Obosnovanie metoda postroeniya avtomatizirovannoi sistemy upravleniya proizvoditel'nost'yu motor-ventilyatorov na elektrovozakh [Substantiation of the method for constructing an automated control system for the performance of motor-fans on electric locomotives]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2012, no. 3(62), pp. 90–95.
35. Astrakhantsev L.A., Astashkov N.P., Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantseva N.M. Povyshenie elektromagnitnoi sovместimosti podvizhnogo sostava [Improving the electromagnetic compatibility of rolling stock]. *Bezopasnost' regionov – osnova ustoichivogo razvitiya* [Safety of regions – the basis of sustainable development], 2012, vol. 1-2, pp. 92–94.
36. Kuz'mich V.D., Rudnev V.S., Frenkel' S.Ya. Teoriya lokomotivnoi tyagi [Theory of locomotive traction]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 446 p.

### Информация об авторах

**Немыкина Валентина Валерьевна**, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: nemykinavv@mail.ru.

### Information about the authors

**Valentina V. Nemykina**, Ph.D. student of the Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: nemykinavv@mail.ru.



## Увеличение провозной способности железной дороги Монголии при создании новых транспортных коридоров

Г.И. Суханов, А.В. Супруновский✉, Д. Баясгалан

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

✉as.irgups@gmail.com

### Резюме

Глобальная транспортная система играет важную роль в развитии экономических и социальных связей между странами. Одним из направлений является формирование транспортных коридоров из Европы в Азию через территорию Российской Федерации. На современном этапе экономического развития России создание транснациональных транспортных коридоров особенно актуально. Мировой логистический рынок растет и изменяется, увеличиваются объемы перевозок в направлении стран Азиатско-Тихоокеанского бассейна. С каждым годом потребность стран Азии в полезных ископаемых возрастает, что, в свою очередь, увеличивает грузопоток и нагрузку на существующие транспортные линии, поэтому и необходимо развивать дополнительные транспортные пути. В статье авторами рассмотрена возможность открытия нового железнодорожного транспортного коридора на территории Монгольской Народной Республики. В работе дается оценка эффективности различных вариантов маршрута, проведен сравнительный анализ между уже существующими коридорами и планируемым к открытию. Описаны необходимые технические и технологические преобразования, вследствие которых повысится пропускная способность железнодорожных линий Улан-Баторской железной дороги, а также мероприятия по модернизации пограничных переходов на границах страны. В результате открытия нового транспортного коридора на территории Монголии, увеличится пропускная способность железной дороги страны. Выполненные мероприятия позволят реализовать перспективный план по наращиванию объемов перевозок до 2030 г. из России в направлении стран Азиатско-Тихоокеанского региона.

### Ключевые слова

транспортный коридор, Улан-Баторская железная дорога, транснациональный коридор, провозная способность, модернизация железнодорожных линий

### Для цитирования

Суханов Г.И. Увеличение провозной способности железной дороги Монголии при создании новых транспортных коридоров / Г.И. Суханов, А.В. Супруновский, Д. Баясгалан // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 120–129. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).120-129.

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 19.09.2022 г.; принята к публикации: 20.09.2022 г.

## Increasing the carrying capacity of the Mongolian railway when creating new transport corridors

G.I. Sukhanov, A.V. Suprunovskii✉, D. Bayasgalan

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉as.irgups@gmail.com

### Abstract

The global transport system plays an important role in the development of economic and social ties between countries. One of the directions is the formation of transport corridors from Europe to Asia through the territory of the Russian Federation. At the present stage of Russia's economic development, the creation of transnational transport corridors is especially important. The global logistics market is growing and changing, the volume of traffic is increasing in the direction of the countries of the Asia-Pacific basin. Every year, the need of Asian countries for minerals is increasing, which, in turn, increases the flow of goods and the load on existing transport lines, therefore making it necessary to develop additional transport routes. In the article the possibility of opening a new railway transport corridor on the territory of the Mongolian People's Republic is considered. The paper assesses the effectiveness of various route options, a comparative analysis is carried out between existing corridors and those planned for opening. The necessary technical and technological transformations are described, resulting in the increase of carrying capacity of the Ulaanbaatar railway lines, as well as measures for modernizing crossings at the country's borders. As a result of the opening of a new transport corridor on the territory of Mongolia, the capacity of the country's railway will increase. The activities completed will make it possible to implement a long-term plan to increase the volume of traffic from Russia to the countries of the Asia-Pacific region until 2030.

**Keywords**

transport corridor, Ulaanbaatar railway, transnational corridor, carrying capacity, modernization of railway lines

**For citation**

Sukhanov G.I., Suprunovskii A.V., Bayasgalan D. Uvelichenie provoznoi sposobnosti zheleznoi dorogi Mongolii pri sozdanii novykh transportnykh koridorov [Increasing the carrying capacity of the Mongolian railway when creating new transport corridors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 120–129. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).120-129.

**Article info**

Received: September 13, 2022; Revised: September 19, 2022; Accepted: September 20, 2022.

**Введение**

На сегодняшний день железнодорожный транспорт – ключевой стратегический объект развития. Данная отрасль является системообразующей, она взаимосвязана с социальными, экономическими проектами, а также во многом определяет уровень жизни людей.

В странах Азиатско-Тихоокеанского бассейна с каждым годом увеличивается потребность в поставке энергоносителей, лесоматериалов, сырья, металла из РФ [1]. Такая тенденция к росту перевозок неизбежно влечет за собой модернизацию уже существующих транспортных коридоров и создание новых альтернативных транспортных путей [1, 2].

В современных условиях происходит переориентация и рост транспортных потоков в направлении Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Планируется прирост объема перевозимых грузов не менее чем в 1,5 раза к существующему [3].

Транспортный коридор представляет собой постоянное направление перевозки больших объемов грузов и включает в себя не только поток грузов, но и организационные структурные процессы, а также технические средства, увеличивающие эффективность перевозочного процесса.

Мировая торговля в последнее время все больше обращается к международным транспортным коридорам. По ним перевозят грузы между континентами, странами и их регионами.

Железнодорожная инфраструктура между Китаем и Европой является наиболее оптимальным решением, отлично подходящим для большинства транспортных бизнес-моделей. Железнодорожные перевозки находятся между недорогими, но медленными морскими перевозками и дорогостоящими и быстрыми авиаперевозками. Практически по всем существующим маршрутам товары могут перевозиться из Азии в Европу на железнодорожном транспорте.

В сравнении с другими маршрутами преимущество транспортного коридора заключается в сокращении срока доставки грузов, надежности и сохранности грузов, в отдельных случаях – низкой стоимости доставки [3].

Формирование международных транспортных коридоров преследует основную цель – ускорить продвижение грузопотоков в международной сфере и повысить привлекательность перевозок в различных направлениях [4]. Сейчас внешнеэкономические связи России все больше направлены в сторону Китая и Монголии. Это обуславливается увеличением влияния Востока. Страны Азиатско-Тихоокеанского бассейна задают темпы роста, общественного и экономического развития [5].

Монгольское и китайское направления являются приоритетными во внешней политике РФ. Россию, Китай и Монголию связывают многочисленные проекты. Углеводороды – одна из важнейших статей экспорта в Китай – 1991,91 млрд руб. – 59 % от общего объема. Показатели поставок руды в сравнении с 2019 г. выросли на 4791,4 тыс. руб. При этом объемы перевозок других товаров группы также растут в меньших темпах [6].

Энергетическое сотрудничество с Китаем является для России на данном этапе одним из приоритетных. На территории Монголии ведется строительство газопровода из России в Китай (продолжение газопровода «Сила Сибири-2»). При этом вопрос поставок газа в Монголию остается не решенным, что также позволяет рассчитывать на увеличение объема его перевозок за счет данного направления.

**Значение транспортного коридора Россия – Монголия – Китай для Монголии**

Из общей величины грузопотоков на направлении Азия – Европа Россия может пропускать транзитом через свою территорию примерно 10–15 % [6, 7]. Часть этих грузопото-

ков может проходить по международному транспортному коридору Россия – Монголия – Китай (рис. 1).

До недавнего времени мощности транзитных перевозок в РФ и Монголии использовались не в полном объеме. Географически Россия и Монголия позволяют осуществлять перевозки между странами Европы и Азии [8]. Причинами использования транзитных потоков не в полной мере являются недостаточное развитие транспортной логистики, отсутствие современного транспортного обслуживания, нехватка грузовых терминалов.

Одной из ключевых отраслей, определяющих развитие Монголии как современной транспортной страны, является железнодорожное сообщение, которое указывает на социально-экономический ориентир страны, достаток и высокий уровень социального развития населения.

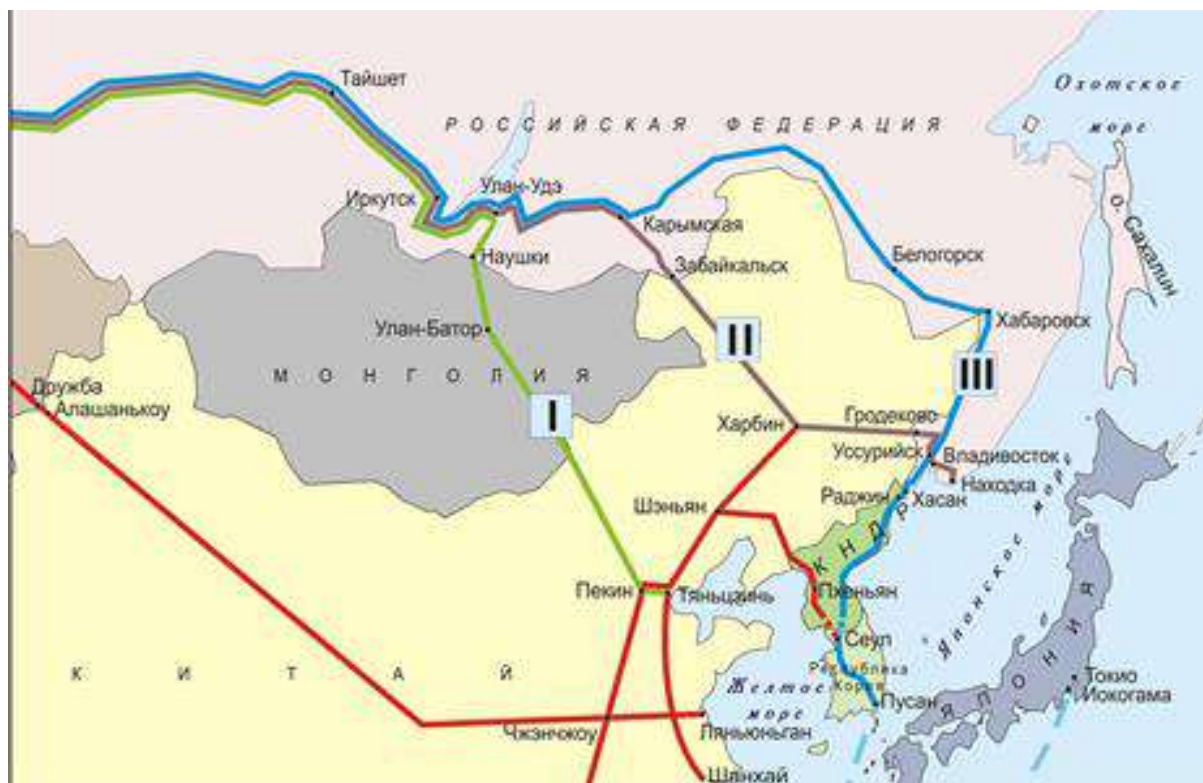
Современные темпы развития международных связей, дает возможность использовать Монголии свое географическое расположение между Юго-Восточной Азией и Европой. Также нельзя не отметить удачное пограничное положение между Россией и Китаем. Такое расположение открывает большие транспортные возможности перед Монголией. Дает огромный по-

тенциал для открытия новых транспортных коридоров. На сегодняшний день такой потенциал используется не полностью, лишь половина возможного объема грузопотоков проходит через территорию Монголии.

В настоящее время в Монголии имеется одна железная дорога – Российско-Монгольское акционерное общество «Улан-Баторская железная дорога» [9, 10]. Ее протяженность 1 811 км, она обеспечивает 96 % грузовых перевозок и 48 % пассажирооборота страны. Однако и она используется не полностью из-за низкой перерабатывающей способности приграничного терминала, перегружающего грузы из вагонов колеи 1 435 мм со стороны Китая в вагоны монгольской дороги с шириной колеи 1 520 мм.

В соответствии с прогнозами ведущих экономистов [11] торговый потенциал Китая превысит 1 трлн долл. к 2024 году. Но, к сожалению, лишь малая часть от всего объема грузооборота между странами Азии и Европейского союза проходит по транспортным коридорам, расположенным на территории Монголии.

Крупные соседние страны Монголии заинтересованы в увеличении провозной способности железной дороги Монгольской Народной



**Рис. 1.** Транспортный коридор Россия – Монголия – Китай  
**Fig. 1.** Russia – Mongolia – China transport corridor

Республики. Организация транзитных коридоров через ее территорию позволит увеличить объемы перевозок по России [12], открыть новые транснациональные коридоры, а также разгрузить уже существующие. Такое сотрудничество повлечет за собой привлечение новых инвестиций в транспортную отрасль всех стран-участниц [13, 14].

Монголия, как и соседние страны, осуществляет структурные изменения в железнодорожной отрасли в виде ограничения государственного регулирования деятельности транспортных предприятий, обновления законодательства, перехода от транспортной монополии к свободной конкуренции.

С целью организации здоровой конкуренции и внедрения новых технологий в транспортную отрасль страны, государственное собрание (Хурал) Монголии приняло «Закон о железнодорожном транспорте». Основной целью государственной политики в отношении железнодорожного транспорта является экономический рост, развитие индустриальной отрасли, увеличение транзитных перевозок по территории страны [14, 15].

В соответствии с принятым курсом выполнена работа по созданию единой железнодорожной сети. Организованы разветвленные

транспортные связи между добывающими производствами. Осуществлены проекты по модернизации логистических терминалов для повышения перегрузочных мощностей на пограничных пунктах с Россией и Китаем [15].

Приоритетным направлением для реализации транснациональных путей является Трансазиатская магистраль, которая соединяется с Транссибом.

Увеличение транспортного потока по железной дороге Монголии как части трансазиатского коридора [16] потребовало постройки логистического терминала на пограничном пункте Дзамын-Ууд с Китаем с привлечением инвестиций от Азиатского банка развития.

Международный пограничный железнодорожный переход Дзамын-Удэ-Эрлян (Монголия – Китай) – основной пункт, через который проходят грузоперевозки в направлении Китая.

Переход является пограничной перегрузочной станцией и выполняет полный комплекс операций по приему и отправлению поездов, перемещению грузов из вагона в вагон из-за смены ширины колеи, перестановке грузовых вагонов с тележек одной колеи на другую, формированию и расформированию составов.

На границе с Китаем расположена станция

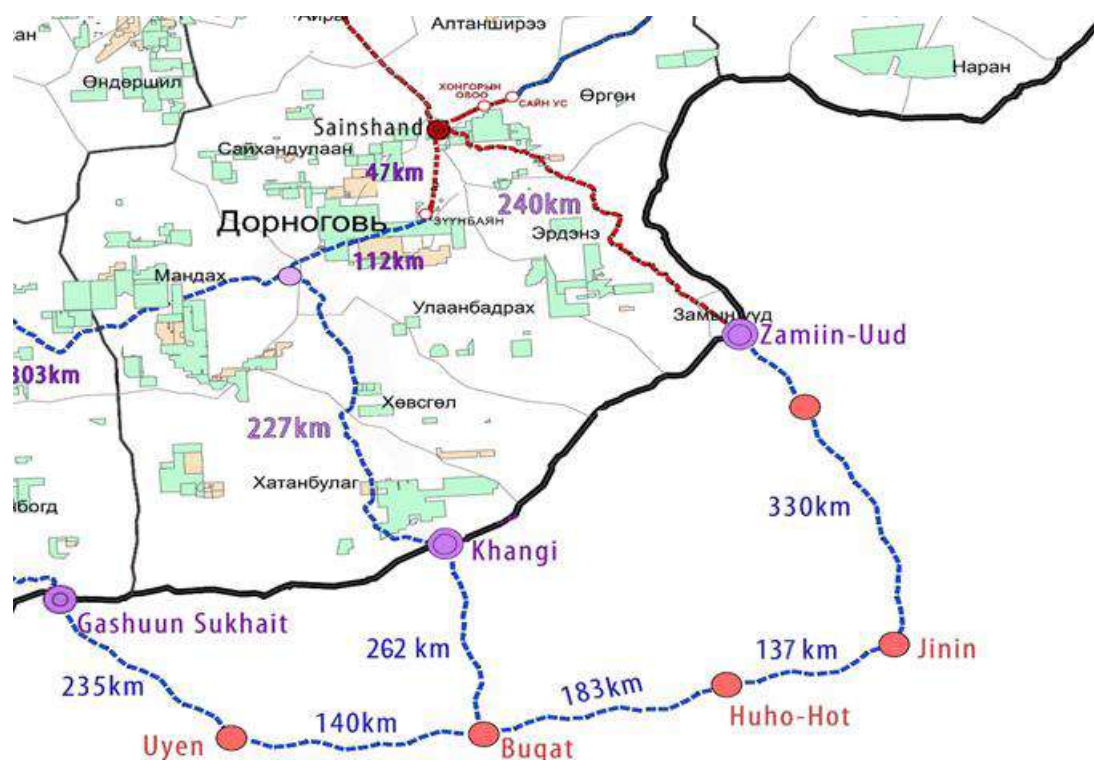


Рис. 2. Развитие сети железных дорог Монголии  
Fig. 2. Development of Mongolian railway network

с одним приемоотправочным парком с шириной колеи 1 435 мм. Также две станции с шириной колеи 1 520 мм. Задача станций – осуществлять перегрузку перевозимых товаров из вагонов колеи 1 435 мм в вагоны колеи 1 520 мм.

Техническое оснащение ст. Дзамын-Ууде: один парк для таможенного досмотра, пункт технического обслуживания вагонов, четыре грузовых терминала (состоят из путей «узкой» и «широкой» колеи), пункт перестановки вагонов с колеи на колею. Существующий пункт перестановки имеет 42 позиции для перестановки колесных пар грузовых вагонов.

Вагонооборот на переходе Дзамын-Уудэ-Эрлянэ на конец 2015 г. составлял 300–350 вагонов за сутки, в настоящее время он вырос до 450 [17]. Железнодорожные составы в основном имеют длину 48–52 у. е., а контейнерные поезда до 32 у. е.

### Общие показатели эффективности

Простой поездов на пограничных станциях напрямую связан с техническим оснащением, при передаче грузопотоков с железнодорожного транспорта одной ширины колеи на другую. Вследствие чего эффективность транснационального коридора снижается [18]. С це-

лью повышения эффективности на стыковых пунктах пограничных станций Монголии и Китая (Замын-Ууд и Эрлянэ) была выполнена реконструкция (рис. 2).

Реконструкция ст. Замын-Ууд позволила сократить время, затрачиваемое на таможенный досмотр и пограничный контроль с 4 до 2,5 ч, что, в свою очередь, увеличило пропускную способность станции до 12 пар поездов в сутки. На основании приведенных в табл. 1 сведений для приоритета развития пограничных стыков с учетом интенсивности движения прежде всего требуется создание новых транспортных коридоров.

Рассмотрим открытие нового пограничного перехода по ст. Ханги в качестве второго перехода на Китай по железной дороге (табл. 2).

В зависимости от объема предполагаемого груза в сутки проходит 4–11 пар поездов; в 2023 г. 7 млн т, в сутки 4 пары поездов; в 2024 г. 9 млн т, в сутки 5 пар поездов; в 2025 г. 12 млн т, в сутки 7 пар поездов; в 2026–2028 гг. 15 млн т, в сутки 9 пар поездов; в 2029–2037 гг. 18 млн т, в сутки 10 пар поездов; в 2038–2042 гг. 19,5 млн т, в сутки 11 пар поездов (табл. 3).

**Таблица 1.** Техническая характеристика дороги Ханги-Мандал  
**Table 1.** Technical characteristics of the Khangi-Mandal road

Показатель Indicator	Характеристика Characteristic
Общая протяженность дороги, км / Total length of the road, km	226,9
Нагрузки на ось, т / Axle loads, t	25
Ширина колеи, мм / Track width, mm	1 520
Руководящий уклон, % / guiding bias, %	Четный 6, нечетный 9 (Even 6, uneven 9)
Мост, шт. / Bridge, piece	234
Тоннель, шт. / Tunnel, piece	4
Тип стрелочного перевода / Turnout type	ТВ60 стандарт (standard), 1/11, 1/9
Количество жб шпал на 1 км пути, шт. / Number of reinforced concrete sleepers per 1 km of track; piece	На кривой радиус не менее 1 200 м – 1 667 (On a curve with radius no less than 1 200 м – 1 667); на кривой радиус менее 1 200 м – 1 840 (On a curve with radius less than 1 200 м – 1 840)
Минимальный радиус дороги, м / Minimum road radius, m	4 000–1 200
Марка рельсов / Rail brand	ТВ60 стандарт (standard) ТВ/Т 2344-2012
Скрепление рельсов / Rail fastening	Пандрол (Pandrol), CZ, APC

*Примечание.* Весовая норма грузовых поездов была рассчитана на 10 000 т в зависимости от уклона дороги. При расчете сравнивается количество груза в сутки и нетто одного грузового поезда.

*Note.* The weight rate of freight trains was calculated for 10,000 tons, depending on the slope of the road. The calculation compares the amount of cargo per day and the net of one freight train.

**Таблица 2.** Требуемая пропускная способность железнодорожной линии и расстояния между станциями  
**Table 2.** Required capacity of the railway line and distances between stations

Показатель Indicator	Единица измерения Unit of measurement	Количество Amount
Объем груза / Cargo volume	млн т/год	20
Руководящий уклон / Guiding bias	промилли	6
Норма веса поезда / Train weight rate	т брутто	10 000
Масса поезда / Train mass	т нетто	7 800
Количество грузовых поездов в сутки / Number of freight trains per day	пары поездов	9
Количество пассажирских поездов в сутки / Number of passenger trains per day	Пар поезд/сут	1
Требуемая пропускная способность / Required passthrough capacity	Пар поезд/сут	9
Максимальная протяженность перегона / Maximum haul distance	км	37
Количество промежуточных станций и разъезд / Number of intermediate stations and sidings	шт.	2+6

**Таблица 3.** Прогнозируемый объем грузов  
**Table 3.** Forecast volume of cargo

Показатель Indicator	Годы / Years					
	2023	2024	2025	2026–2028	2029–2037	2038–2042
Сроки, год / Terms, year	1	1	1	3	9	5
Годовой объем перевозок, млн т. / Annual traffic volume mln t	7	9	12	15	18	19,5
Количество станций, ед. / Number of stations	2	2	2	2	2	2
Количество разъездов, ед. / Num- ber of sidings, piece	2	2	3	4	5	6
Скорость поезда, км/ч / Train speed, km/h	80	80	80	80	80	80
Погрузка, тн/сут / Loading, t/day	18,9	24,3	35,1	43,2	48,6	54,0
Погрузка, тн/мес / Loading, t/month	567	729	1 053	1 296	1 458	1 620
Погрузка, тн/год / Loading, t/year	6 804	8 748	12 636	15 552	17 496	19 440

Провозная способность железной дороги Ханги была рассчитана поэтапно (первый этап – 10 млн т, второй – 15 млн т и третий – 20 млн т).

Провозная способность ( $\Gamma$ ) – характеристика, отражающая возможность перевезти определенное количество груза в единицу времени рассчитанным значением пар поездов  $N$ .

Вариант 1.

$$N = \frac{1440 - 60}{115 + 54 + 2 + 3 + 2} \cdot 0,85 = 6,66 \text{ пар поез- дов};$$

$$\Gamma = \frac{365 \cdot N_M \cdot Q_{бр} \cdot \varphi}{10^6 \cdot K_M} + \Gamma_{уск} + \Gamma_{сб} = \frac{365 \cdot 6,66 \cdot 6000 \cdot 0,75}{10^6 \cdot 1,14} = 9,6 \text{ млн } \frac{\text{т}}{\text{год}}$$

Вариант 2.

$$N = \frac{1440 - 60}{62 + 45 + 2 + 3 + 2} \cdot 0,85 = 10,29 \text{ пар поездов};$$

$$\Gamma = \frac{365 \cdot 10,29 \cdot 6000 \cdot 0,75}{10^6 \cdot 1,14} = 14,8 \text{ млн } \frac{\text{т}}{\text{год}}$$

Вариант 3.

$$N = \frac{1440 - 60}{43 + 36 + 2 + 3 + 2} \cdot 0,85 = 13,64 \text{ пар поездов};$$

$$\Gamma = \frac{365 \cdot 13,64 \cdot 6000 \cdot 0,75}{10^6 \cdot 1,14} = 19,65 \text{ млн } \frac{\text{т}}{\text{год}}$$

### Экономическая эффективность

Проект железной дороги Зуунбаян – Ханги оценивается в 40 269,5 млн руб. с учетом инфраструктуры, подвижного состава, зоны

погрузки и разгрузки и зоны таможенного контроля (табл. 4).

Общий объем инвестиций на инфраструктуру и подвижной состав составляет 36 936,7 млн руб. Стоимость проектирования, контроля и управления оценивается в 3 110,1 млн руб. (развитие инфраструктуры: энергоснабжение, снабжение

чистой и грязной водой и строительство), на базовую подготовку необходимо 3 788,6 млн руб. Подсчитано, что при наличии 226,9 км железных дорог и инфраструктуры стоимость 1 км дороги составит 115,1 млн руб.

Ожидается, что в рамках проекта будет инвестировано 5 326,6 млн руб. в зону перевалки (терминал) (1 372,8 млн руб. на

Таблица 4. Основные показатели экономической эффективности

Table 4. Main indicators of economic efficiency

Показатель Indicator	Единица измерения Unit of measurement	Сумма Sum	Количество Amount
Длина главного хода / Main stroke length	км / km	–	226,9
Развернутая длина / Unfolded length	км / km	–	286,9
Общий объем инвестиций / Total investment	млн руб. / mln rub	42 265,4	–
Инвестиция / инфраструктура Investment / infrastructure	млн руб. / mln rub	26 169,5	–
Инвестиция / подвижной состав Investment / rolling stock	млн руб. / mln rub	10 767,2	–
Затрат постройки 1 км пути / Cost of building 1 km of track	млн руб. / mln rub	115,36	–
Сравнение инвестирования инфраструктуры и подвижного состава / Comparison of investment in infrastructure and rolling stock	%	–	60/40
Объем груза / Cargo volume	млн т / mln t	–	332,5
Грузооборот / Cargo turnover	млрд т·км / bln t/km	–	75,4
Общий доход / Total income	млрд руб. / bln rub	178,3	–
Расход на зарплату / Payroll expense	млн руб. / mln rub	19 860,9	–
Взносы на социальное страхование / Social security contributions	млн руб. / mln rub	2 879,4	–
Подоходный налог с физических лиц / Personal income tax	млн руб. / mln rub	1 754,4	–
Топливо / Fuel	млн руб. / mln rub	15 878,4	–
Общие расходы на амортизацию / General depreciation expenses	млн руб. / mln rub	31 619,7	–
Общие операционные расходы / General operating expenses	млрд руб. / mln rub	129 761,4	–
Общая стоимость / General expenses	млрд руб. / bln rub	135 354,1	–

Таблица 5. Сравнение вариантов маршрута

Table 5. Comparison of route options

Показатель Indicator	Сайншанд – Ханги – Мандал – Бугат Sainshand – Hangi – Mandal – Bugat	Сайншанд – Замын – Үүд – Эрээн – Бугат Zamyn – Uud – Ereen – Bugat	Разница Difference
Расстояние доставки, км / Delivery distance, km	590	908	318
Объем перевозки в год, млн т / Transportation volume per year, mln t	4,5	4,5	–
Стоимость доставки в год, руб. / Transportation cost per year, rub	5 347 487 077,34	6 595 398 517,88	1 247 911 440,54
Стоимость доставки за тонну, руб./ Transportation cost a ton, rub	1 189,94	1 467,18	277,24
Преимущества / Advantages	Транспортное расстояние сократилось на 318 км; снижена стоимость доставки; увеличилось количество перевозимых грузов в год; сократилось расстояние доставки Reduced transport distance by 318 km; reduced shipping cost; increased number of transported goods per year; the delivery distance shortened		

перевалку грузов с железной дороги на автомобильную и 1 714,3 млн руб. – с железной дороги «широкой» колеи на «узкую») и зону контроля (таможня).

Железная дорога Зуунбаян-Ханги станет главной, соединяющей горнодобывающие районы южных и центральных районов Монголии с рынком Китайской Народной Республики (табл. 5).

В настоящее время экспорт угля для энергетики из центральных регионов Монголии невозможен из-за нагрузки на пограничный переход Замын-Ууд-Эрлянь. Строительство новой железной дороги позволит увеличить экспорт угля.

Монголия располагает запасами железной руды более 1 млрд т, из которых около 700 млн т находится в Дархан-Селенгинском регионе, около 200 млн т – вблизи Улан-Баторской железной дороги (в пределах 200 км от трассы в обе стороны). По состоянию на 2020 г. около 8,2 млн т железной руды отправлялось на перерабатывающий комплекс в Баотоу.

### Заключение

Строительство железной дороги Зуунбаян – Ханги снизит существующую нагрузку, которая сейчас имеется на пограничных пунктах Замын-Ууд и Эрлянь,

сократит протяженность маршрута перевозки железной руды из Монголии на металлургический комбинат в китайском Баотоу на 318 км. Возникает необходимость введения в эксплуатацию новых железнодорожных линий, а также увеличения пропускной способности имеющихся линий для транспортировки растущих объемов грузов. Строительство железнодорожной линии Зуунбаян – Ханги является одним из ключевых пунктов программы развития железнодорожной инфраструктуры Монголии.

Основные цели стратегии развития транснациональных транспортных коридоров:

- исключение ограничивающих участков инфраструктуры коридоров;
- повышение уровня транспортного обслуживания за счет развития транспортно-логистической инфраструктуры;
- минимизация технологических и таможенных барьеров;
- выполнение совместных международных проектов.

Реализация перечисленных целей позволит обеспечить повышение объемов транзитного потока до 2030 г.

Реализация вышеперечисленных целей позволит обеспечить повышение объемов транзитного потока до 2030 г.

### Список литературы

1. Пехтерев Ф.С., Замковой А.А. О формировании научных задач по созданию интегральной евроазиатской транспортной системы в контексте развития международных транспортных коридоров // Бюл. Объедин. учен. совета ОАО «РЖД». 2018. № 1. С. 28–36.
2. Егоров В.Г. Геополитика транспортных коридоров // Геоэкономика энергетики. 2021. Т. 14. № 2. С. 6–31.
3. Бессонов Г.И., Степанова Н.Н. Трансиб в системе евро-азиатских перевозок: новые возможности и перспективы // Железнодорожный транспорт. 2019. № 3. С. 5–10.
4. Самуйлов В.М., Неволин Д.Г., Калашников А.Е. Роль транспортного коридора «Россия – Китай» в перевозке экспортных грузов // Инновационный транспорт. 2020. № 4 (38). С. 15–20.
5. Петров М.Б., Казаков А.Л. Прогнозирование взаимного влияния формирования грузопотоков на полигоне железной дороги и развития транспортной сети в евроазиатских экономических коридорах // Экономический коридор «Китай – Монголия – Россия»: географические и экологические факторы и возможности территориального развития : тезисы Междунар. географ. конф. Иркутск, 2018. С. 178–179.
6. Ивуть Р.Б., Пильгун Т.В. Современные тенденции развития евроазиатских транспортных коридоров // Новости науки и технологий. 2019. № 3 (50). С. 19–26.
7. Степанов Н.С. Транспортные коридоры в рамках китайской инициативы «Один пояс – один путь» // Вестник НГИЭИ. 2021. № 8 (123). С. 112–119.
8. Жариков Е.П., Денисов В.В. Развитие внешнеэкономических связей Северо-Восточных провинций Китая с южными районами Российского Дальнего Востока // Азиатско-Тихоокеанский регион: экономика, политика, право. 2015. № 4. С. 37–52.
9. Казаков А.Л., Жарков М.Л., Супруновский А.В. О моделировании трансграничных российско-монгольских железнодорожных перевозок // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 3 (55). С. 23–32.
10. Журавлева Н.А., Урываев С.В. Моделирование схем международного взаимодействия в евразийских транспортных коридорах на основе железнодорожной инфраструктуры // Бюл. результатов науч. исслед. 2021. № 3. С. 137–148.
11. Харламова Ю.А. Международный транспортный коридор «Север-Юг» в раскладе транспортных геостратегий // Вестник транспорта. 2019. № 6. С. 2–7.



12. Квитко К.Б. Сравнительный анализ международных транспортных систем: инфраструктура, рейтинги, транспортные коридоры // *Транспортные системы и технологии*. 2020. Т. 6. № 1. С. 15–29.
13. Мамаев Э.А., Сорокин Д.В., Долгий И.Д. К оценке потенциала развития международного транспортного коридора: теоретические аспекты // *Вестн. Рост. гос. ун-та путей сообщ.* 2020. № 4 (80). С. 89–101.
14. Рыбинцев А.Г., Масольгин А.В. Концепция Новой Евразии и геоэкономика Центральной Азии // *Экономика и предпринимательство*. 2020. № 5 (118). С. 130–134.
15. Implications of «One Belt, One Road» Strategy for China and Eurasia / G. Cheng, Lu. Chen, D. A. Degterev et al. // *Vestnik RUDN. International Relations*. 2019. Vol. 19. № 1. P. 77–88.
16. Судьин А.В. Проекты международного транспортного коридора Европа – Западный Китай // *Евразийский союз ученых*. 2020. № 8–3 (77). С. 58–61.
17. Прокофьева Т.А. Развитие логистической инфраструктуры как стратегическое направление интеграции России в систему международных транспортных коридоров // *В центре экономики : электрон. журн.* 2021. № 1. С. 1–10. URL <https://vces.ru/index.php/vces/article/view/31> (дата обращения 18.04.2022).
18. Осминин А.Т. Увеличение пропускных и провозных способностей за счет повышения эффективности перевозочного процесса и транспортного обслуживания // *Бюл. Объедин. учен. совета ОАО РЖД*. 2018. № 2. С. 14–31.

### References

1. Pekhterev F.S., Zamkovo A.A. O formirovani nauchnykh zadach po sozdaniyu integral'noi evroaziatskoi transportnoi sistemy v kontekste razvitiya mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [On the formation of scientific tasks for the creation of an integral Eurasian transport system in the context of the development of international transport corridors]. *Bulleten' Ob'edinnogo uchenogo soveta OAO «RZhD»* [Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways], 2018, no. 1, pp. 28–36.
2. Egorov V.G. Geopolitika transportnykh koridorov [Geopolitics of transport corridors]. *Geoekonomika energetiki* [Geoeconomics of Energy], 2021, vol. 14, no. 2, pp. 6–31.
3. Bessonov G.I., Stepanova N.N. Transsib v sisteme evro-aziatskikh perevozok: novye vozmozhnosti i perspektivy [Transsib in the system of Euro-Asian transportation: new opportunities and prospects]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2019, no. 3, pp. 5–10.
4. Samuilov V.M., Nevolin D.G., Kalashnikov A.E. Rol' transportnogo koridora «Rossiya – Kitai» v perevozke eksportnykh грузов [The role of the transport corridor «Russia – China» in the transportation of export cargo]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2020, no. 4(38), pp. 15–20.
5. Petrov M.B., Kazakov A.L. Prognozirovaniye vzaimnogo vliyaniya formirovaniya gruzopotokov na poligone zheleznoi dorogi i razvitiya transportnoi seti v evroaziatskikh ekonomicheskikh koridorakh [Forecasting the mutual influence of the formation of freight traffic on the railway site and the development of the transport network in the Eurasian economic corridors]. *Tezisy Mezhdunarodnoi geograficheskoi konferentsii «Ekonomicheskii koridor «Kitai – Mongoliya– Rossiya»: geograficheskie i ekologicheskie faktory i vozmozhnosti territorial'nogo razvitiya»* [Thesis of the International Geographical Conference «Economic corridor «China – Mongolia – Russia»: geographical and environmental factors and opportunities for territorial development»]. Irkutsk, 2018, pp. 178–179.
6. Ivut' R.B., Pilgun T.V. Sovremennye tendentsii razvitiya evroaziatskikh transportnykh koridorov [Modern trends in the development of Eurasian transport corridors]. *Novosti nauki i tekhnologii* [News of Science and Technology], 2019, no. 3(50), pp. 19–26.
7. Stepanov N.S. Transportnye koridory v ramkakh kitaiskoi initsiativy «Odin poias – odin put'» [Transport corridors within the framework of the Chinese initiative «One belt – one way»]. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo inzhenerno-ekonomicheskogo universiteta* [Bulletin of Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics], 2021, no. 8(123), pp. 112–119.
8. Zharikov E.P., Denisov V.V. Razvitie vneshneekonomicheskikh svyazei Severo-Vostochnykh provintsii Kitaya s yuzhnyimi raionami Rossiiskogo Dal'nego Vostoka [Development of foreign economic relations of the North-Eastern provinces of China with the southern regions of the Russian Far East]. *Aziatsko-Tikhookeanskiy region: ekonomika, politika, pravo* [Asia-Pacific region: economics, politics, law], 2015, no. 4, pp. 37–52.
9. Kazakov A.L., Zharkov M.L., Suprunovskii A.V. O modelirovani transgranichnykh rossiisko-mongol'skikh zheleznodorozhnykh perevozok [On the modeling of cross-border Russian-Mongolian rail transportation]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2022, no. 3(55), pp. 23–32.
10. Zhuravleva N.A., Uryvaev S.V. Modelirovaniye skhem mezhdunarodnogo vzaimodeistviya v evraziiskikh transportnykh koridorakh na osnove zheleznodorozhnoi infrastruktury [Modeling of schemes of international interaction in the Eurasian transport corridors based on the railway infrastructure]. *Bulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2021, no. 3, pp. 137–148.
11. Kharlamova Yu.A. Mezhdunarodnyi transportnyi koridor «Sever-Yug» v rasklade transportnykh geostrategii [International transport corridor «North-South» in the layout of transport geostrategies]. *Vestnik transporta* [Bulletin of transport], 2019, no. 6, pp. 2–7.
12. Kvitko K.B. Sravnitel'nyi analiz mezhdunarodnykh transportnykh sistem: infrastruktura, reitingi, transportnye koridory [Comparative analysis of international transport systems: infrastructure, ratings, transport corridors]. *Transportnye sistemy i tekhnologii* [Transport systems and technologies], 2020, vol. 6, no. 1, pp. 15–29.
13. Mamaev E.A., Sorokin D.V., Dolgiy I.D. K otsenke potentsiala razvitiya mezhdunarodnogo transportnogo koridora: teoreticheskie aspekty [To assess the development potential of the international transport corridor: theoretical aspects]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2020, no. 4(80), pp. 89–101.

14. Rybinets A.G., Masolygin A.V. Kontseptsiya Novoi Evrazii i geoeconomika Tsentral'noi Azii [The concept of New Eurasia and the geo-economics of Central Asia]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and Entrepreneurship], 2020, no. 5(118), pp. 130–134.

15. Cheng G., Chen Lu., Degterev D.A. et al. Implications of «One Belt, One Road» Strategy for China and Eurasia. *Vestnik RUDN. International Relations*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 77–88.

16. Sud'in A.V. Proekty mezhdunarodnogo transportnogo koridora Evropa – Zapadnyi Kitai [Projects of the international transport corridor Europe - Western China]. *Evraziiskii soyuz uchenykh* [Eurasian Union of Scientists], 2020, no. 8–3(77), pp. 58–61.

17. Prokof'eva T.A. Razvitiye logisticheskoi infrastruktury kak strategicheskoe napravlenie integratsii Rossii v sistemu mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Development of logistics infrastructure as a strategic direction of Russia's integration into the system of international transport corridors]. *V tsentre ekonomiki* [In the center of the economy], 2021, no. 1, pp. 1–10.

18. Osminin A.T. Uvelichenie propusknykh i provoznykh sposobnostei za schet povysheniya effektivnosti perevoznogo protsessa i transportnogo obsluzhivaniya [Increasing throughput and carrying capacity by improving the efficiency of the transportation process and transport services]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO «RZhD»* [Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways], 2018, no. 2, pp. 14–31.

### Информация об авторах

**Суханов Георгий Иванович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [sukhanov\\_gi@irgups.ru](mailto:sukhanov_gi@irgups.ru).

**Супруновский Антон Викторович**, старший преподаватель кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [as.irgups@gmail.com](mailto:as.irgups@gmail.com).

**Баясгалан Даваасурэн** аспирант кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [davka-iriit@yandex.ru](mailto:davka-iriit@yandex.ru).

### Information about the authors

**Georgii I. Sukhanov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operational work management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [sukhanov\\_gi@irgups.ru](mailto:sukhanov_gi@irgups.ru).

**Anton V. Suprunovskii**, Assistant Professor of the Department of Operational work management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [as.irgups@gmail.com](mailto:as.irgups@gmail.com).

**Bayasgalan Davaasuren** Ph.D. student of Department of Operational work management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [davka-iriit@yandex.ru](mailto:davka-iriit@yandex.ru).

## Моделирование расхода сжатого воздуха пневматических систем на примере работы тормозов поезда в режиме зарядки и отпуска

А.А. Хамнаева✉

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

✉alenalend95@mail.ru

### Резюме

В статье рассматриваются вопросы моделирования пневматических процессов, универсальности пневматических систем применительно к различным отраслям экономики. Моделирование выполнено на примере пневматической тормозной системы грузового отечественного подвижного состава, для чего рассмотрена схема тормозного оборудования поезда с основными тормозными приборами и проанализированы направления движения воздуха по воздуховодам в основных режимах. При создании модели использован подход с аппроксимацией экспериментальных данных путем выбора математической функции и подбора ее параметров. Моделирование направлено на решение частной задачи определения изменения расхода сжатого воздуха в тормозной системе подвижного состава по давлению в источнике (в главном резервуаре) для двух режимов работы: зарядка тормозов и поддержание зарядного давления в тормозной магистрали при поездном режиме. Пневматическая система поезда может работать в режиме потребления для насыщения сжатым воздухом тормозных приборов, что предполагает нестационарный характер процесса. Наряду с этим тормозная система может работать в режиме компенсации утечек сжатого воздуха из-за недостаточной плотности в соединениях, что предполагает стационарный характер течения процесса. В силу таких особенностей работы пневматической системы были предложены два уравнения для стационарного и нестационарного режимов. Представленное решение моделирования расхода сжатого воздуха по снижению давления в источнике помимо железнодорожного подвижного состава применимо для аналогичных пневматических систем общепромышленного назначения.

### Ключевые слова

подвижной состав железных дорог, пневматические тормоза подвижного состава, тормозная система подвижного состава, стационарные пневматические процессы, нестационарные пневматические системы, цифровой двойник поезда

### Для цитирования

Хамнаева А.А. Моделирование расхода сжатого воздуха пневматических систем на примере работы тормозов поезда в режиме зарядки и отпуска / А.А. Хамнаева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 130–138. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).130-138.

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 1.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 7.09.2022 г.; принята к публикации: 8.09.2022 г.

## Modeling of the compressed air consumption in the pneumatic systems on the example of the train brakes operation during charging and release mode

А.А. Khamnaeva✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉alenalend95@mail.ru

### Abstract

The article considers the issue of modeling the pneumatic processes and the universality of pneumatic systems in relation to various sectors of the economy. The simulation is carried out illustrated with the example of the pneumatic braking system of domestic freight rolling stock, for which the scheme of the train's braking equipment with the main braking devices is considered and the directions of air movement through the ducts in the main modes are analyzed. When creating the model, an approach was used with the approximation of experimental data by choosing a mathematical function and selecting its parameters. The simulation was aimed at solving a particular problem of determining the change in the flow of compressed air in the braking system of rolling stock by the pressure in the source (in the main tank) for two modes of operation: charging the toruses and maintaining the charging pressure in the brake line during train mode. The pneumatic system of the train can operate in the consumption mode to saturate the brake devices with compressed air, which implies a non-stationary character of the process. At the same time, the braking system can operate in the mode of compensation for compressed air leaks due to loose joints, implying the stationary nature of the process. Due to these features of the operation of the pneumatic system, two equations were proposed for stationary and non-stationary modes. The proposed solution for modeling the flow of compressed air to reduce the pressure in the source, aside from railway rolling stock, is applicable for similar pneumatic systems of general industrial use.

**Keywords**

rolling stock of railways, pneumatic brakes of rolling stock, rolling stock braking system, stationary pneumatic processes, non-stationary pneumatic systems, digital twin of the train

**For citation**

Khamnaeva A.A. Modelirovanie raskhoda szhatogo vozdukha pnevmaticheskikh sistem na primere raboty tormozov poezda v rezhime zaryadki i otpuska [Modeling of the compressed air consumption in the pneumatic systems on the example of the train brakes operation during charging and release mode]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 130–138. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).130-138.

**Article Info**

Received: September 1, 2022; Revised: September 7, 2022; Accepted: September 8, 2022.

**Введение**

Пневматика, наряду с гидравликой, широко применяется как для автоматизации различных производственных процессов на предприятиях, так и в автоматических тормозных системах поездов по всему миру [1–5]. Неоспоримыми плюсами использования пневмооборудования являются надежность и экологическая чистота (пневматика использует воздух), вследствие чего пневматические машины лучше защищены от перегрузок, что, в свою очередь, обеспечивает безопасность, а возможность создания сжатого воздуха прямо на локомотиве позволяет сохранять тормозную систему в работоспособном состоянии несмотря на утечки [6, 7].

Промышленная пневматика в том или ином виде используется в следующих отраслях экономики: железнодорожный транспорт; металлургия; горнодобывающая промышленность; машиностроение; пищевая индустрия; химическая промышленность; легкая промышленность; складское дело.

Наряду с железнодорожным транспортом пневматические клапаны используются в трубопроводных распределительных сетях для перенаправления потоков жидкостей и газов. Сжатый воздух отключает и включает высоковольтные выключатели на электрических подстанциях. Без пневматики не обходится ни одно современное транспортное средство промышленного назначения и грузовые большегрузные автомобили. Спектр применения пневматического оборудования очень широк [8].

Конфигурация пневматических систем может быть абсолютно различной и включать в себя как однообразные приборы, работающие в одинаковых режимах, так и абсолютно различные по характеру потребления сжатого воздуха пневматические системы [9, 10]. В состав типовой пневматической системы входят следующие элементы: компрессор; пневмопровода; пневма-

тические распределители; пневмоцилиндры исполнительных механизмов.

В систему включаются отдельные емкости (резервуары) для сжатого воздуха, в большинстве случаев баллоны для него входят в комплектацию компрессора и собираются с ним в одном корпусе.

Одним из сложнейших видов пневматических систем является тормозная система железнодорожного подвижного состава [11, 12]. При эксплуатации пневматических систем часто возникает вопрос о необходимости контроля расхода сжатого воздуха в процессе работы технологических линий, либо определения возникающих неисправностей [6, 7, 13]. Для реализации данных направлений работы есть несколько путей:

1. Установка различного рода датчиков давления, расходомеров и других контролируемых приборов по всей системе. Такой вид контроля за расходом ресурсов пневмолиний и контроля ее исправностей является дорогостоящим и ненадежным. Чаще выходить из строя начинают приборы контроля, нежели какие-либо контролируемые элементы пневмолиний.

2. Создание систем мониторинга на основании моделирования процессов, происходящих в пневмосистеме и расстановке датчиков в математической модели. Такая технология также широко известна как цифровой двойник. Основным вопросом использования данной технологии является создание математических моделей функционирования системы [7, 11]. В случае с пневматическими системами – это математические модели газодинамических процессов.

При создании математических моделей газодинамических процессов важно учитывать, что моделирование должно предполагать наиболее простые математические зависимости. На сегодняшний день существуют различные методы и расчетные среды газодинамики и

пневматики, однако данные системы применимы в основном для проектирования, их расчеты занимают много времени, требуют большой экспериментальной и инженерной проработки. Для создания математических моделей с целью реализации технологий цифрового двойника, при решении задач диагностики и контроля расхода воздуха необходимо применение более простых уравнений, которые легко могли бы рассчитываться микропроцессорами со средней производительностью, т. е. широкодоступных на рынке компьютерной техники.

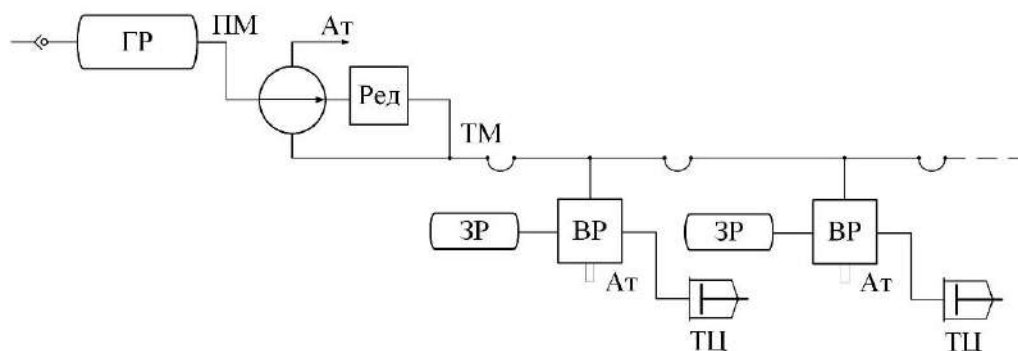
### Описание объекта, постановка задачи

В данной статье рассматривается решение частной задачи по моделированию процесса изменения расхода сжатого воздуха в тор-

можной системе подвижного состава (рис. 1). Конкретно будет производиться моделирование процесса изменения давления в источнике (в главном резервуаре), в случае, если пневматическая система начинает работать в режиме потребления, при этом характер потребителей является нестационарным [7, 14, 15]. В пневматической системе происходит множество процессов, поэтому сконцентрируемся на конкретном примере.

Рассмотрим модель, относящуюся к процессу восстановления давления в тормозной системе состава, и приведем пример для решения задачи.

Для процесса восстановления давления в тормозной магистрали поезда характерно заполнение объемов – потребителей, которыми



**Рис. 1.** Схема тормозной системы подвижного состава:

МК – мотор-компрессор; ГР – главный резервуар; ПМ – питательная магистраль;

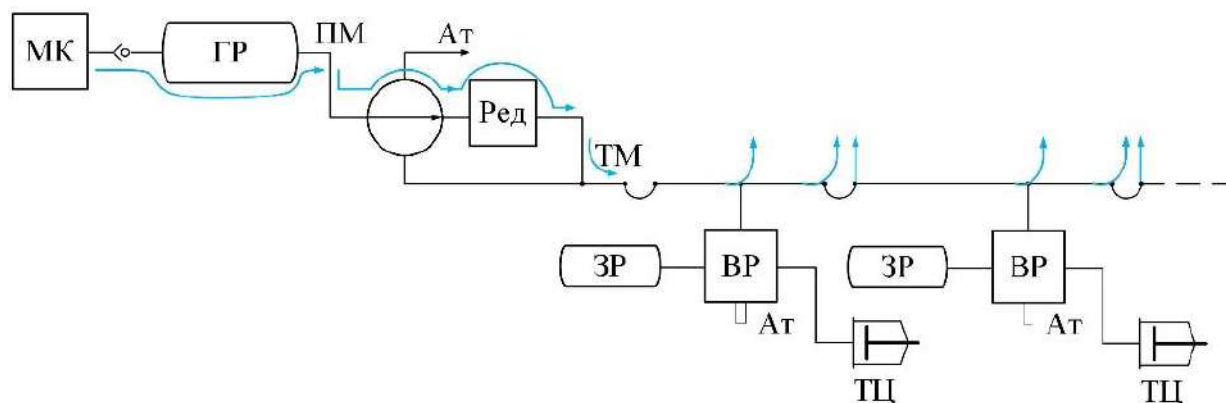
Ат – атмосфера; Ред – редуктор; ТМ – тормозная магистраль;

ВР – воздухораспределитель; ЗР – запасный резервуар; ТЦ – тормозной цилиндр

**Fig. 1.** Diagram of the rolling stock braking system:

МК – motor-compressor; ГР – main tank; ПМ – feeding line; Ат – atmosphere; Ред – reducer;

ТМ – brake line; ВР – air distributor; ЗР – spare tank; ТЦ – brake cylinder



**Рис. 2.** Схема движения сжатого воздуха в тормозной системе при стационарном потоке из главного резервуара в поездном режиме работы тормозной системы и в режиме перекрыши

**Fig. 2.** Diagram of the compressed air movement in the braking system under a stationary flow from the main tank in the train and overlap operation mode of the braking system

выступают запасные резервуары и камеры воздухохораспределителей, расположенные на вагонах, при этом период заполнения сжатым воздухом потребителей дольше, чем период восстановления давления в главных резервуарах компрессором. Кроме того, система негерметична, как и любая пневмолиния, что создает постоянное стационарное течение воздуха – потери на поддержание рабочего давления в системе [11, 16, 17].

Постоянные потери воздуха в системе приводят к тому, что в источнике сжатого воздуха давление постоянно снижается, схема движения сжатого воздуха представлена на рис. 2. Данный процесс характерен для поездного режима работы тормозной системы подвижного состава и перекрыши [6, 7]. В случае, когда пневмооборудование не работает в режиме торможения или в режиме зарядки, график снижения давления в главном резервуаре имеет постоянную форму, и если рассматривать соседние циклы снижения давления в главных резервуарах и откачки, то они идентичны по форме (рис. 3).

При этом время всех циклов соответствует выражению (1):

$$\Delta t_{c1} = \Delta t_{c2} = \Delta t_{c3}, \quad (1)$$

где  $\Delta t_{ci}$  – время снижения давления в главных резервуарах между откачками компрессора.

### Математическое моделирование

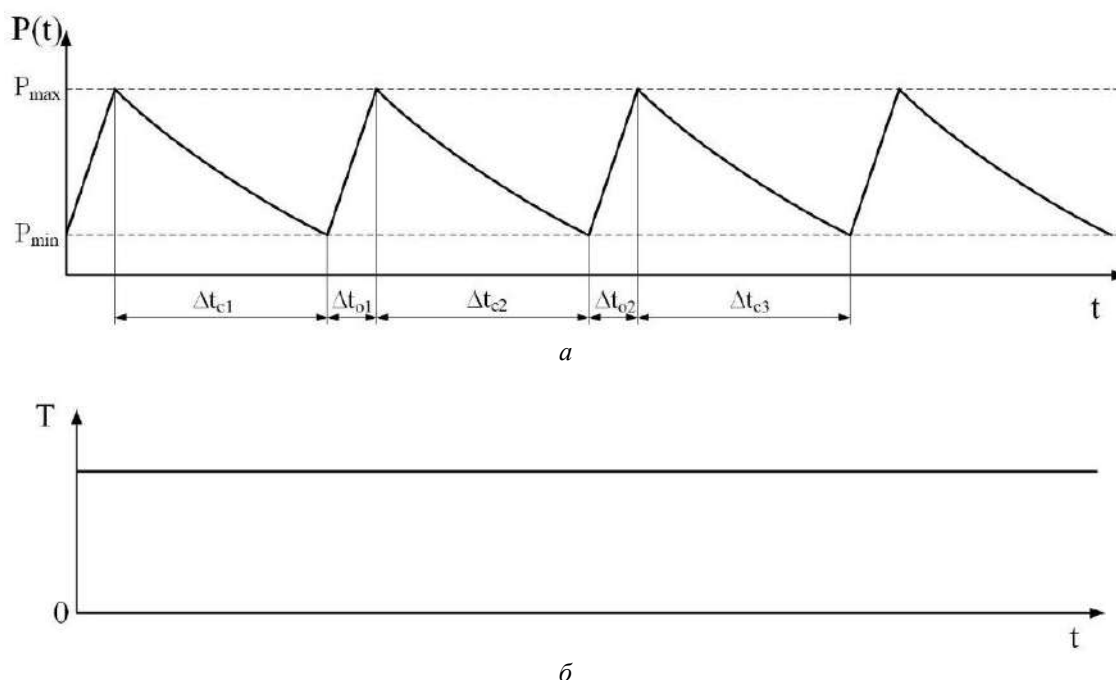
Если рассматривать рис. 3, где потребление сжатого воздуха происходит с постоянной интенсивностью за счет утечек, то его можно описать функцией (2):

$$P(t) = P_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (2)$$

где  $P_{\max}$  – максимальное значение давления в главных резервуарах;  $e$  – оператор экспоненциальной функции;  $t$  – текущее время;  $T$  – параметр времени процесса снижения давления в главных резервуарах.

В данном случае  $T = \text{const}$  для всех циклов откачки как показано на графике (см. рис. 3, б).

При повышении расхода воздуха, связанного с восстановлением израсходованного за-



**Рис. 3.** Графическое изображение основных динамических параметров давления и времени при стационарном процессе в зависимости от времени:

*a* – давление в главных резервуарах; *б* – зависимость параметра времени процесса снижения давления в главных резервуарах

**Fig. 3.** Graphical representation of the main dynamic parameters of pressure and time in a stationary time dependent process:  
*a* – pressure in the main tanks; *b* – dependence of the time parameter on the pressure reduction process in the main tanks

паса энергии газа в пневматических приборах, фронт снижения кривой давления в главных резервуарах становится круче (рис. 4, а). При этом за несколько циклов откачки компрессора скорость снижения давления в главных резервуарах восстанавливается [18]. Время всех циклов соответствует выражению (3):

$$\Delta t_{c1} \langle \Delta t_{c2} \langle \Delta t_{c3}, \quad (3)$$

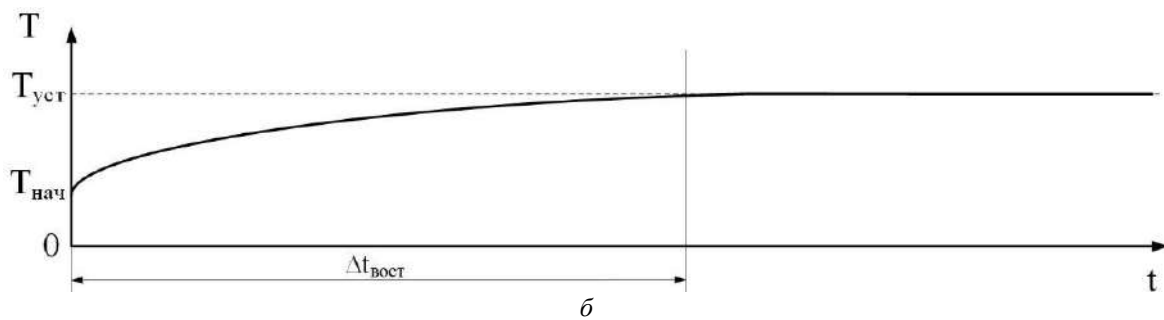
Для такого процесса характерен нестационарный поток воздуха, выходящий из главного резервуара, направленный на заполнение тормозных приборов (рис. 5), такая схема свойственна для режима отпуска тормозов.

Если рассматривать графики на рис. 4, где идет насыщение сжатым воздухом потребителей, параметр времени процесса  $T$  приобретает переменный характер. Данный параметр зависит от удельного расхода сжатого воздуха, его можно попытаться рассчитать при помощи экспери-

ментальных данных или фундаментальных уравнений, однако оба этих метода имеют определенную сложность [5, 17]. Если рассматривать процесс математически, то наиболее простым для моделирования процесса является подбор функций изменения данной величины, т. е. если говорить о том, что процесс на рис. 3 является стационарным, так как поток во времени постоянен, а процесс на рис. 5 – нестационарным, то это указывает на то, что показатель в экспоненциальной функции  $T$  будет переменной величиной, тогда необходимо заменить параметр  $T$  функцией, описывающей график на рис. 4, б.

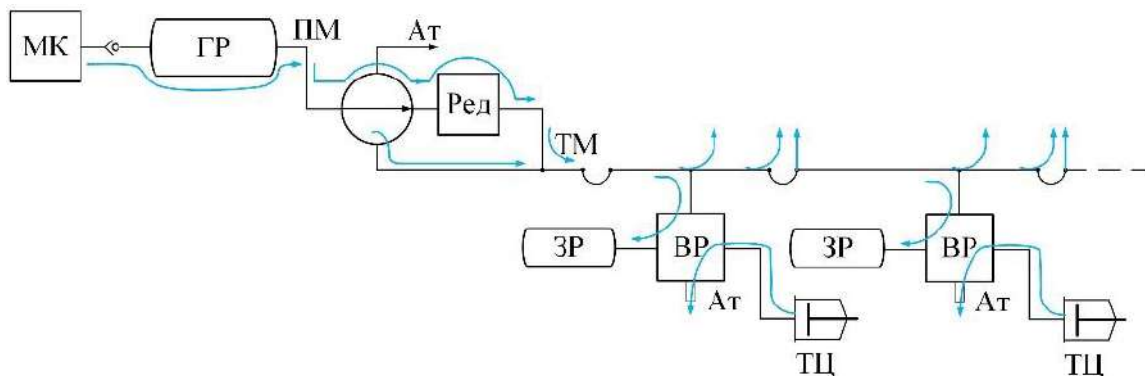
Насыщение сжатым воздухом тормозной системы можно описать по рис. 4, б.

Появляется цель подобрать функцию, описывающую график (см. рис. 4, б), т. е. произвести его аппроксимацию. Рассмотрев варианты функций, подходящей принята гипербола, по-



**Рис. 4.** Графическое изображение основных параметров изменения давления при нестационарном процессе в зависимости от времени: а – давление в главных резервуарах; б – зависимость параметра времени процесса снижения давления в главных резервуарах;

**Fig. 4.** Graphical representation of the main parameters of time dependent pressure changes in a non-stationary process depending on time: а – pressure in the main tanks; б – dependence of the time parameter on the pressure reduction process in the main tanks



**Рис. 5.** Схема движения сжатого воздуха в тормозной системе при нестационарном потоке из главного резервуара в режиме отпуска тормозов

**Fig. 5.** Diagram of the compressed air movement of compressed air in the brake system with an unsteady flow from the main tank in the brake release mode

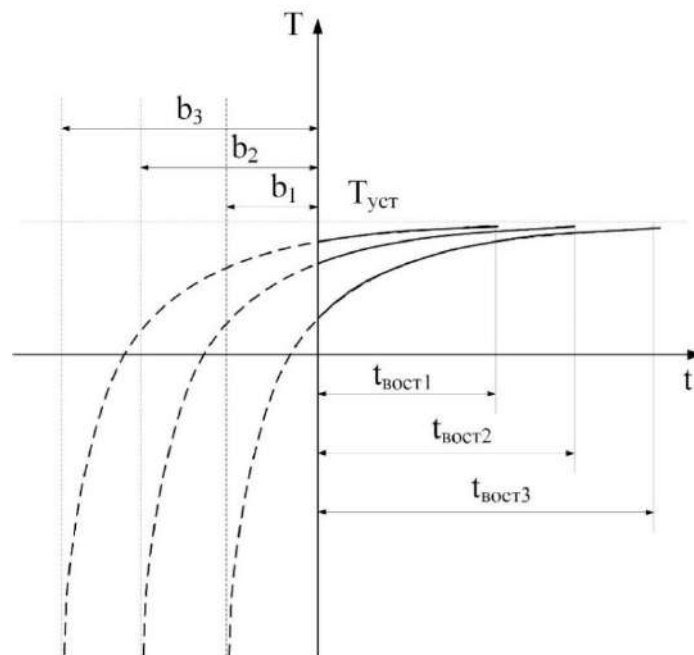
сколькx обладает гибкостью при различных вариантах изменения параметра времени процесса. Так как целью моделирования является создание цифрового двойника, дополнительным плюсом использования функции гиперболы является возможность перемещения ее вдоль оси абсцисс без изменения формы (рис. 6).

Время установления стационарного потока сжатого воздуха из главных резервуаров зависит от степени истощения тормозной системы в процессе торможения. Считаем, что система восстановилась после торможения в момент, когда параметр времени процесса примет постоянное значение равное  $T_{уст}$ . Чем больше

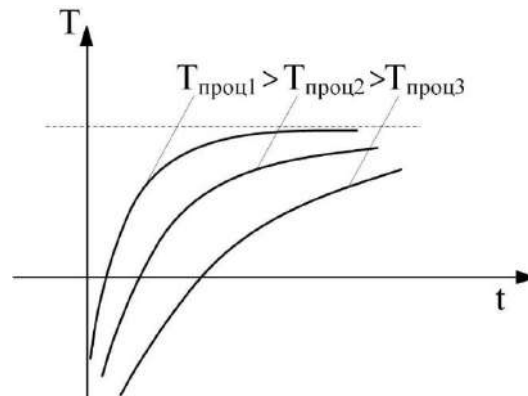
степень истощения, тем больше времени требуется для восстановления давления тормозных приборов и запасных резервуаров.

Время восстановления  $t_{вост}$  зависит от глубины разрядки при торможении (рис. 6), а изменение функции при различных значениях  $t_{вост}$  происходит за счет параметра  $b$ .

Параметром  $T_{проц}$  можно изменять величину первой производной  $dP / dt$ , которая зависит от объема главных резервуаров, интенсивности утечек и объема потребителей. Влияние  $T_{проц}$  на форму кривой моделируемой функции показано на рис. 7.



**Рис. 6.** Графики гиперболической функции, описывающие динамику параметра времени процесса при отпуске тормозов после разрядок различной величины  
**Fig. 6.** Graphs of the hyperbolic function describing the dynamics of the process time parameter when the brakes are released after discharges of various magnitude



**Рис. 7.** Графики гиперболической функции при изменении нестационарного процесса  
**Fig. 7.** Graphs of a hyperbolic function under a non-stationary process changing



С учетом сказанного гиперболическая функция, описывающая параметр времени процесса  $T(t)$ , примет вид, указанный в выражении (4):

$$T(t) = T_{уст} - \frac{T_{проц}}{t+b}, \quad (4)$$

где  $T_{уст}$  – установившееся значение времени процесса, характерное для стационарного процесса;  $T_{проц}$  – параметр времени, характеризующий интенсивность процесса восстановления давления в тормозной магистрали;  $t$  – время;  $b$  – параметр, характеризующий время восстановления стационарного потока из главных резервуаров.

Переменные, входящие в состав функции (4) показаны на рис. 8.

Так как планируется использовать приведенную математическую модель для технологии цифрового двойника процесса восстановления сжатого воздуха из главного резервуара, все переменные должны замеряться при помощи датчиков либо вычисляться на основании замеров [7, 18].

Значения переменных  $T_{нач}$ ,  $T_{уст}$ ,  $t_{вост}$  возможно снять при помощи датчиков, а  $T_{проц}$ ,  $b$  – необходимо вычислять на основании замеренных переменных. Для их вычисления были выведены выражения.

Параметр, характеризующий время восстановления стационарного потока из главных резервуаров  $b$  можно определить при помощи вы-

ражения (5):

$$b = \frac{T_{проц}}{T_{уст} - T_{нач}}, \quad (5)$$

где  $T_{нач}$  – параметр времени процесса в момент начала отпуска тормозов.

Параметр, определяющий величину параметра времени процесса  $T$  относительно ее установившегося значения, при котором процесс восстановления считается завершенным, определяется по (6):

$$a = 1 - k \quad (6)$$

где  $k = 0,9 - 0,95$  – коэффициент параметра  $a$ .

Параметр времени, характеризующий интенсивность процесса восстановления давления в тормозной магистрали, определяется по выражению (7):

$$T_{проц} = \frac{(1-k) \cdot T_{уст} \cdot t_{вост}}{\left(1 + \frac{(1-k) \cdot T_{уст}}{T_{уст} - T_{нач}}\right)}, \quad (7)$$

Чтобы описать функцию снижения давления в главных резервуарах  $P(t)$ , подставим в (2) выражение (4) и отразим результат уравнения в выражении (8):

$$P(t) = P_{max} \cdot e^{-\frac{t}{T_{уст} - \frac{T_{проц}}{t+b}}}, \quad (8)$$

где  $P_{max}$  – максимальное значение давления в главных резервуарах;  $e$  – оператор экспоненциальной функции;  $t$  – текущее время;  $T_{уст}$  – установившееся значение времени процесса, свой-

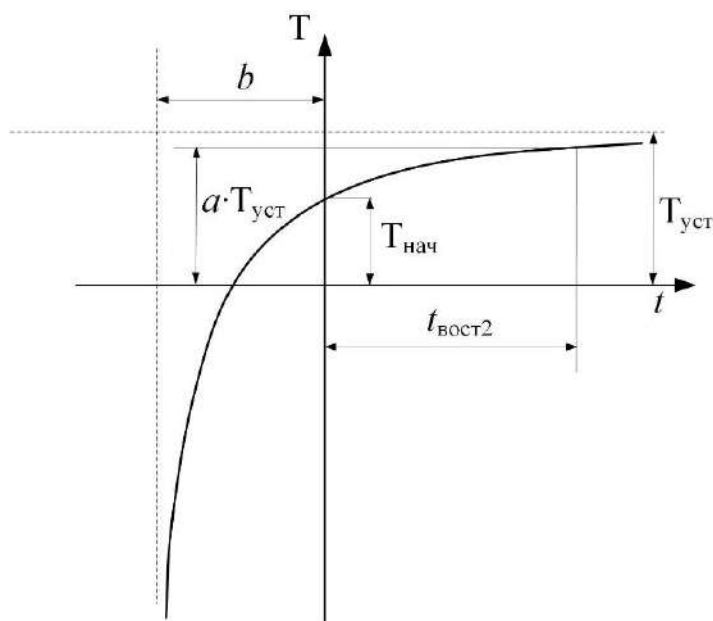


Рис. 8. Переменные математической модели, характеризующие функцию параметра времени процесса  $T(t)$   
 Fig. 8. Variables of the mathematical model characterizing the function of the time parameter of the process  $T(t)$

ственное для стационарного процесса;  $T_{\text{проц}}$  – параметр времени, характеризующий интенсивность процесса восстановления давления в тормозной магистрали;  $b$  – параметр, определяющий время восстановления стационарного потока из главных резервуаров.

В ходе аппроксимации функции было получено выражение (8) для моделирования процесса снижения давления в главных резервуарах при нестационарном процессе.

### Заключение

Полученная функция позволит реализовать элемент технологии цифрового двойника, а именно, в режиме реального времени на ос-

новании полученных функций смоделировать нестационарный процесс снижения давления в главных резервуарах в ходе насыщения сжатым воздухом тормозной системы поезда после торможения [7, 9]. Результаты моделирования система диагностики или управления должны сравнивать с реальными значениями, полученными при помощи датчиков и далее на основании совпадения или расхождения результатов делать выводы или определять управляющее воздействие. Полученный результат может быть применим как к тормозной системе подвижного состава, так и к другим пневматическим цепям с аналогичной структурой.

### Список литературы

1. Исследование температуры тормозных колодок с разной степенью износа в процессе фрикционного торможения / П.Ю. Иванов, А.М. Худонов, Е.Ю. Дульский и др. // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 3 (47). С. 27–34.
2. Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness / P. Ivanov, A. Khudonogov, E. Dulskiy et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. P. 012086. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012086.
3. Abbasia S., Teimourimaneshb Sh., Vernerssonb T. Temperature and thermoelastic instability at tread braking using cast iron friction material // Wear. 2013. Vol. 314. P. 171–180.
4. A. Hamdaoui, El.H. Jaddi. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 149. P. 1–4.
5. Petersson M. Two-dimensional finite element simulation of the thermal problem at railway block braking // Mechanical Engineering Science. 2015. Vol. 216. P. 259–273.
6. Применение аддитивных технологий при проектировании и изготовлении автотормозного оборудования / Н.С. Горбунова, Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов и др. // Молодая наука Сибири. 2021. № 1 (11). С. 44–50. URL <https://mnv.irgups.ru/en/node/754> (дата обращения 04.03.2022).
7. Система диагностики тормозной сети поезда / А.М. Худонов, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов и др. // Локомотив. 2019. № 4 (748). С. 30–31.
8. Кузнецов Ю.В., Кузнецов М.Ю. Сжатый воздух. Екатеринбург : УрОРАН, 2007. 510 с.
9. Исследование работы стабилизатора крана машиниста условный № 395 / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский и др. // Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств : материалы второй всерос. науч.-техн. конф. Омск, 2017. С. 62–69.
10. Особенности построения систем управления с применением технологии «цифровой двойник» на основе микроконтроллеров «Миландр» / Н.О. Дробышев, П.Ю. Иванов, С.В. Ковыршин и др. // Молодая наука Сибири : электрон. журн. 2020. № 2 (8). С. 264–269.
11. Карвацкий Б.Л. Общая теория автотормозов. М. : Трансжелдориздат, 1947. 299 с.
12. 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.
13. 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. Саратов, 2021. С. 28–36.
14. Пудовиков О.Е., Муров С.А. Совершенствование системы автоматического управления пневматическим тормозом грузового длинносоставного поезда // Транспорт: наука, техника, управление. 2014. № 4. С. 21–26.
15. Иванов П.Ю., Мануилов Н.И., Дульский Е.Ю. Причины самопроизвольного срабатывания автотормозов в грузовых поездах // Известия Транссиба. 2017. № 2(30). С. 17–25.
16. Зарубежный опыт повышения эффективности пневматических тормозов / П.Ю. Иванов, Е.Ю. Дульский, Н.И. Мануилов и др. // Локомотив. 2020. № 11(767). С. 36–37.
17. Сравнительный анализ тормозных систем подвижного состава с однотрубным и двухтрубным питанием / П.Ю. Иванов, Е.Ю. Дульский, А.А. Хамнаева и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 3 (79). С. 35–42.
18. Мануилов Н.И. Совершенствование методов и средств диагностики тормозной сети поезда : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2019. 190 с.

### References

1. Ivanov P.Yu., Khudonogov A.M., Dulskii E.Yu., Korsun A.A., Treskin S.V. Issledovanie temperatury tormoznykh kolodok 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 Transport University], 2020, no. 3(47), pp. 27–34.

2. Ivanov P., Khudonogov A., Dulskiy E. et al. Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. P. 012086. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012086.

3. Abbasia S., Teimourimaneshb Sh., Vernerssonb T. Temperature and thermoelastic instability at tread braking using cast iron friction material. *Wear*, 2013, vol. 314, pp. 171–180.

4. A. Hamdaoui, El.H. Jaddi. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 149, pp. 1–4.

5. Petersson M. Two-dimensional finite element simulation of the thermal problem at railway block braking. *Mechanical Engineering Science*, 2015, vol. 216, pp. 259–273.

6. Gorbunova N.S., Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Khamnaeva A.A., Novikov N.N. Primenenie additivnykh tekhnologii pri proektirovani i izgotovlenii avtotormoznogo oborudovaniya [Application of additive technologies in the design and manufacture of auto-braking equipment]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2021, no. 1(11), pp. 44–50.

7. Khudonogov A.M., Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Stasevich I.A. Sistema diagnostiki tormoznoi seti poezda [Diagnostic system of the train braking network]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2019, no. 4(748), pp. 30–31.

8. Kuznetsov Yu.V., Kuznetsov M.Yu. Szhatyi vozdukh [Compressed air]. Ekaterinburg: UrORAN RAN, 2007. 510 p.

9. Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Dulskii E.Yu., Khudonogov A.M. Issledovanie raboty stabilizatora krana mashinista usloynyi № 395 [Investigation of the operation of the crane stabilizer of the machinist conditional no 395]. *Materialy vtoroi vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Innovatsionnye proekty i tekhnologii mashinostroitel'nykh proizvodstv»* [Proceedings of II All-Russian Scientific and Technical Conference «Innovative projects and technologies of machine-building industries»]. Omsk, 2017, pp. 62–69.

10. Drobyshev N.O., Ivanov P.Yu., Kovyrshin S.V., Kruglov S.P. Osobennosti postroeniya sistem upravleniya s primeneniem tekhnologii «tsifrovoy dvoynik» na osnove mikrokontrollerov «Milandr» [Features of the construction of control systems using the technology «digital twin» based on microcontrollers «Milander»]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2020, no. 2(8), pp. 264–269.

11. Karvatskii B.L. Obshchaya teoriya avtotormozov [The general theory of auto brakes]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1947. 299 p.

12. 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.

13. Ivanov P.Yu., Korsun A.A., Emelyanov D.O. Sushchestvuyushchie sposoby upravleniya tormoznym nazhatiem s povyshennoy effektivnost'yu [Existing methods of brake pressure control with increased efficiency]. *Sbornik statei XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnye mezhdistsiplinarne issledovaniya»* [Proceedings of XV International Scientific and Practical Conference «Scientific interdisciplinary research»]. Saratov, 2021, pp. 28–36.

14. Pudovikov O.E., Murov S.A. Sovershenstvovanie sistemy avtomaticheskogo upravleniya pnevmaticheskimi tormozom gruzovogo dlinnosostavnogo poezda [Improvement of the automatic control system of the pneumatic brake of a freight long-composite train]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information proceeding], 2014, no. 4, pp. 21–26.

15. Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Dulskii E.Yu. Prichiny samoproizvol'nogo srbatyvaniya avtotormozov v gruzovykh poezdakh [The causes of spontaneous operation of auto brakes in freight trains]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2017, no. 2(30), pp. 17–25.

16. Ivanov P.Yu., Dulskii E.Yu., Manuilov N.I., Khudonogov A.M., Khamnaeva A.A., Korsun A.A., Novikov N.N., Treskin S.V. Zarubezhnyi opyt povysheniya effektivnosti pnevmaticheskikh tormozov [Foreign experience in improving the efficiency of pneumatic brakes]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2020, no. 11(767), pp. 36–37.

17. Ivanov P.Yu., Dulskii E.Yu., Khamnaeva A.A., Korsun A.A., Treskin S.V. Sravnitel'nyi analiz tormoznykh sistem podvizhnogo sostava s odnotrubnym i dvukhtrubnym pitaniem [Comparative analysis of braking systems of rolling stock with single-tube and two-tube power supply]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2020, no. 3(79), pp. 35–42.

18. Manuilov N.I. Sovershenstvovanie metodov i sredstv diagnostiki tormoznoi seti poezda [Improvement of methods and diagnostic tools of the train braking network]. Ph.D's thesis. Irkutsk, 2019. 190 p.

### Информация об авторах

**Хамнаева Алёна Александровна**, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: alenalend95@mail.ru.

### Information about the authors

**Alena A. Khamnaeva**, Ph.D student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: alenalend95@mail.ru.

## Моделирование динамических характеристик вагона в программном комплексе «Универсальный механизм UM»

Л.В. Мартыненко✉

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

✉liuba.martinenko@yandex.ru

### Резюме

Для определения динамики движения подвижного состава при прохождении участков малого радиуса, на которых имеются дефекты пути, предлагается провести динамическое моделирование при заданных значениях технических параметров подвижного состава и пути с учётом режима ведения состава. Данное моделирование позволит определить силовые всплески динамических ударов при прохождении участков с имеющимися неисправностями, а также выявить насколько увеличиваются эти всплески при сочетании нескольких допустимых в эксплуатации отклонений. На основе полученных результатов выполнена оценка опасных сочетаний неисправностей, а также рассмотрены отклонения режимов движения подвижного состава, которые являются определяющими при прохождении участков с ограничением скорости. Анализ выполнен при расследовании конкретных сходов. Он позволил установить взаимосвязь между величинами отклонений контролируемых параметров элементов вагона и пути и уровнем воздействия кривых и горно-перевальных участков на движение объектов. С указанных позиций выявлена и оценена роль непогашенного ускорения в процессе схода вагона при движении по горно-перевальному участку. Нарастание непогашенного ускорения в пределах переходной кривой должно быть ограниченным, так как факторы, влияющие на его изменение, связаны не только с режимом ведения состава, но и с расположением опасных участков, в которых возникают дополнительные боковые силы. В настоящее время особое внимание уделяется скоростным режимам ведения поезда, особенно в кривых и переходных кривых, радиус кривизны которых не является постоянной величиной, и задача прохождения подвижного состава этих участков пути является важной при расследовании аварийных ситуаций. Основные параметры, определяющие безопасность движения и износ рельсов, – величина и характер изменения сил, возникающих при взаимодействии пути и подвижного состава, а также длины переходных кривых.

### Ключевые слова

динамическое моделирование, сход вагонов, технические неисправности вагона, режим ведения подвижного состава, всплески динамических ударов, переходная кривая, радиус кривизны, горно-перевальный участок, нарастание непогашенного ускорения, программный комплекс «Универсальный механизм UM»

### Для цитирования

Мартыненко Л.В. Моделирование динамических характеристик вагона в программном комплексе «Универсальный механизм UM» / Л.В. Мартыненко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 139–148. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).139-148.

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 26.09.2022 г.; принята к публикации: 27.09.2022 г.

## Modeling of the dynamic characteristics of the wagon in the software package «Universal mechanism UM»

L.V. Martynenko

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

✉liuba.martinenko@yandex.ru

### Abstract

To determine the dynamics of rolling stock movement while passing sections with track defects, as well as the influence of technical malfunctions of the car and the driving mode of the train, it is proposed to conduct dynamic modeling at the specified values of the rolling stock and track parameter with the train driving mode taken into account. This simulation will make it possible to determine the power surges of dynamic shocks during the passage of areas with existing malfunctions, as well as to identify how much these surges increase with several permissible deviations in operation combined. Based on the results obtained, an assessment of dangerous combinations of malfunctions was carried out, and deviations in rolling stock movement modes, which are crucial when passing sections with a speed limit, were also considered. The analysis was performed in the course of the investigation of specific derailments, which allowed to establish the relationship between the values of the controlled parameters deviations of the car and the track elements, as well as the degree of involvement in the convergence of these objects when moving in curves and on mountain-pass sections. From these positions, the role of unextinguished acceleration in the process of car derail-

ment during movement in mountain-pass sections is identified and evaluated. The increase in undamped acceleration within the transition curve should be limited, since the factors influencing its change are associated not only with the driving mode of the train, but also with the location of dangerous areas in which additional lateral forces arise. Currently, special attention is paid to the high-speed modes of train driving, especially in curves and transition curves, whose radius of curvature is not a constant value, and the task of rolling stock passing these sections of the track is important in the investigation of emergency situations. The main parameters determining traffic safety and rail wear are the magnitude and nature of the change in forces arising from the interaction of the track and rolling stock, as well as the length of the transition curves.

### Keywords

dynamic modeling, derailment of wagons, technical malfunctions of the wagon, rolling stock driving mode, bursts of dynamic shocks, transition curve, radius of curvature, mining and transshipment section, increase in outstanding acceleration, software package «Universal mechanism UM»

### For citation

Martynenko L.V. Modelirovanie dinamicheskikh kharakteristik vagona v programnom komplekse «Universal'nyi Mehanizm UM» [Modeling of the dynamic characteristics of the wagon in the software package «Universal mechanism UM»]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 139–148. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).139-148.

### Article info

Received: September 14, 2022; Revised: September 26, 2022; Accepted: September 27, 2022.

### Введение

Программный комплекс «Универсальный механизм UM» позволяет включать в состав поезда трехмерные модели железнодорожных экипажей, например, модель трехвагонного сцепа. Это необходимо при исследовании многих железнодорожных задач, например, задачи безопасности движения, где для экипажей в составе поезда необходимо анализировать величины показателей, которые могут быть получены только в пространственной постановке, таких как силы отжатия рельсов, коэффициенты устойчивости при вкатывании колес и др. [1]. При этом все остальные экипажи поезда, пространственная динамика которых не исследуется, могут быть любыми упрощенными моделями, например, одномассовыми.

Согласно методике моделирования, при создании модели указывается количество единиц подвижного состава, их тип, а также тип поглощающих аппаратов, используемых на соответствующем экипаже. Тип экипажа выбирается из базы, включающей модели локомотивов и вагонов, наиболее распространенных на российских железных дорогах. Эта база может быть дополнена моделью любого экипажа. Для этого в самом простом случае достаточно создать графический образ экипажа, задать длину по осям автосцепок, массу экипажа, силы основного сопротивления движению, тяговые характеристики для локомотивов, а также (при необходимости) силы, специфичные для данного экипажа. Каждая единица подвижного состава в терминах программного комплекса представляет собой

подсистему, которая, вообще говоря, может быть моделью любой сложности. Несмотря на то, что в большинстве случаев достаточно одно-массовой модели экипажа, в железнодорожный состав может быть включена уточненная модель грузового вагона с трехэлементными тележками или модель трехвагонного сцепа для более подробного анализа динамики отдельного экипажа в поезде [2, 3].

При моделировании динамики поезда в базе данных модуля также содержатся модели наиболее часто используемых поглощающих аппаратов. В эту базу могут быть добавлены модели с любыми другими характеристиками, описанные с помощью средств программного комплекса.

На следующем шаге указываются модели торможения, используемые на каждом экипаже. При моделировании тормозной силы отдельно рассчитываются сила нажатия тормозной колодки и коэффициент трения между колодкой и колесом [4]. Модель силы нажатия может быть задана двумя способами: с помощью индикаторной диаграммы наполнения тормозного цилиндра или функцией времени. В свою очередь, коэффициент трения может быть задан графиком зависимости от скорости движения и времени. Процесс распространения тормозной волны в главной магистрали задается либо скоростью, либо диаграммой изменения давления в магистрали [5].

Силы дополнительного сопротивления движению (сопротивление от кривой, от уклона и т. д.) рассчитываются по методикам, описанным в «Правилах тяговых расчетов для поездов».

ной работы». При этом можно выбрать формулу для установления силы сопротивления. Довольно часто при определении продольных сил в поезде необходимо проводить исследования на пути сложной конфигурации как в профиле, так и в плане [6].

С помощью инструмента создания макрогеометрии железнодорожного пути в программном комплексе может быть задан путь, который будет набором прямых, переходных кривых, кривых постоянного радиуса и стрелочных переводов в плане и сочетаний различных уклонов в профиле, что позволяет набрать путь любой конфигурации [7]. Динамика вагона в кривых и на горно-перевальных участках пути характеризуется амплитудно-частотными характеристиками, которые получают при моделировании движения состава с разными входными данными (рис. 1). Результаты моделирования зависят от состояния пути, радиуса кривой и скорости движения. Для более глубокого анализа используют и многие другие характеристики вагона, пути и локомотива [8].

Подвижной состав при определенной скорости въезжает на участок с изменением радиуса, которое должно происходить постепенно, но в ходе исследований выявлено, что в кривых участках пути возвышение наружного рельса над внутренним не всегда соответствует данному профилю и скорости.

На колесной паре, которая движется по участку переходной кривой с просадкой, на правой рельсовой нити на 1–4 с наблюдаются

динамические силовые всплески различной величины, превышающие нормативные.

Данный метод позволяет оценить изменение параметров движения в совокупности с трансформацией продольных и вертикальных сил во времени. Динамические добавки рамных сил по второй оси примерно в 1,5 раза меньше, чем по первой, а для боковой силы на набегающем колесе меньше, чем для рамной на 2–3 кН, поскольку часть рамной силы приходится на ненабегающее колесо.

Возникающие в пределах неровности колебания рамных сил имеют знакопеременный характер и продолжаются за пределами неровности на расстоянии до 20 м. Так, просадка длиной 5 м вызывает от 2 до 4 колебаний с длиной волны 4–5 м, что объясняется запаздыванием воздействия неровности на крен кузова при прохождении ее первой и второй тележками. Увеличение высоты перекаса до 20 мм приводит к возрастанию средних значений коэффициента горизонтальной динамики  $K_d$  на 20, 30 и 40 % для перекасов длиной 20, 10 и 5 м и глубиной 20 мм и вызывает увеличение  $K_d$  в среднем на 50 %.

Полученные результаты дают возможность объективно оценить влияние горизонтальных боковых и вертикальных динамических сил при взаимодействии пути и подвижного состава на безопасность движения в кривых и прямых участках пути [9].

Представленные результаты исследований сходов позволяют отнести к недопустимым некоторые сочетания отклонений.

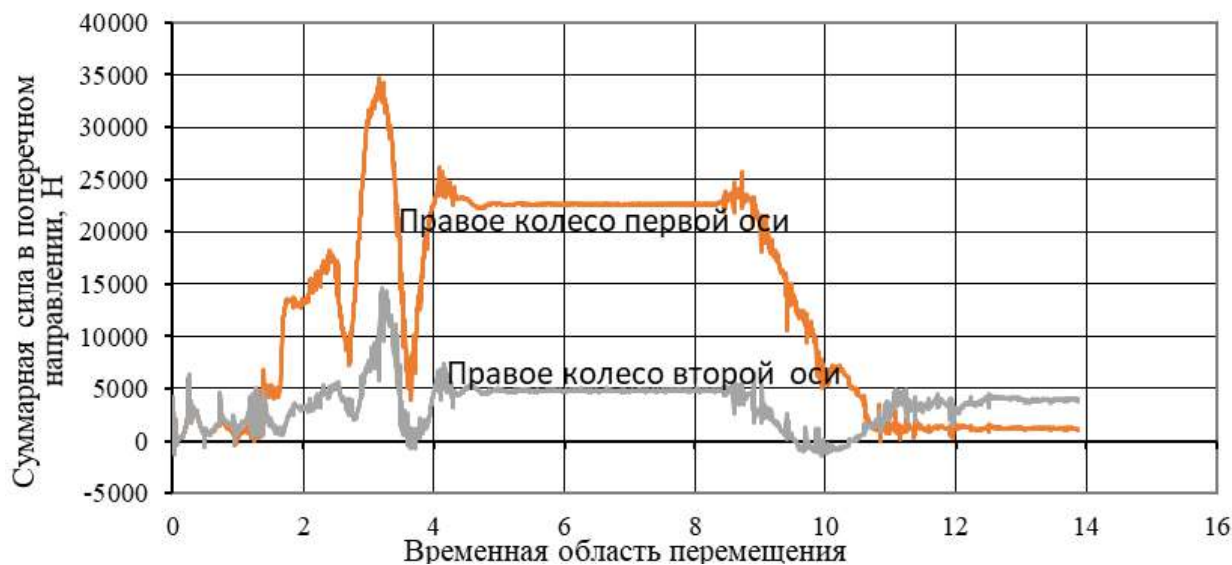


Рис. 1. График динамического движения вагонов в кривом участке пути с просадкой  
Fig.1. Graph of the dynamic movement of wagons in a curved track section with a drawdown

### Расчетно-эмпирическая оценка опасных сочетаний отклонений значений параметров подвижного состава и пути

На основе анализа отклонений технического состояния от нормативных выполнена оценка опасных сочетаний значений параметров вагона и пути, а также режима движения, и определена степень влияния каждого из них на сход подвижного состава. На этой основе выполнен анализ причин конкретных сходов и установлена статистическая зависимость между величинами отклонений контролируемых параметров элементов вагона и пути и уровнем воздействия кривых и горно-перевальных участков на движение объектов. С указанных позиций выявлена и оценена роль непогашенного ускорения в процессе схода вагона при движении на горно-перевальном участке. Нарастание непогашенного ускорения в пределах переходной кривой должно быть ограниченным, так как факторы, влияющие на его изменение, связаны не только с режимом ведения состава, но и с расположением опасных участков, в которых возникают дополнительные боковые силы. В настоящее время уделяется внимание скоростным режимам ведения поезда, особенно в кривых и переходных кривых, радиус кривизны

которых не считается постоянной величиной, и задача прохождения подвижного состава этих участков пути является важной при расследовании аварийных ситуаций. Основные параметры, определяющие безопасность движения и износ рельсов, – величина и характер изменения сил, возникающих при взаимодействии пути с подвижным составом, и длины переходных кривых.

Увеличение непогашенного ускорения ( $a_{нп}$ ) в грузовых поездах более диапазона  $0,3 \text{ м/с}^2$  допускается при наличии технико-экономического обоснования (на направлениях с большой разницей между максимальными скоростями пассажирских и грузовых поездов). Данные варьируются в зависимости от максимально допустимой крутизны отвода возвышения наружного рельса и скорости движения. При увеличении скоростей непогашенное ускорение (при расчетах величина непогашенного ускорения принята равной  $0,3 \text{ м/с}^2$  в круговой кривой, а возвышение наружного рельса –  $90\text{--}150 \text{ мм}$ ) увеличивается и варьируется от  $0,3$  до  $0,95 \text{ м/с}^2$ .

Анализ причастности различных классов отклонений к факту схода в системе «локомотив – вагон – путь» используется при расследовании аварийных ситуаций. Таким образом было ис-

Технические характеристики схода  
Derailment specifications

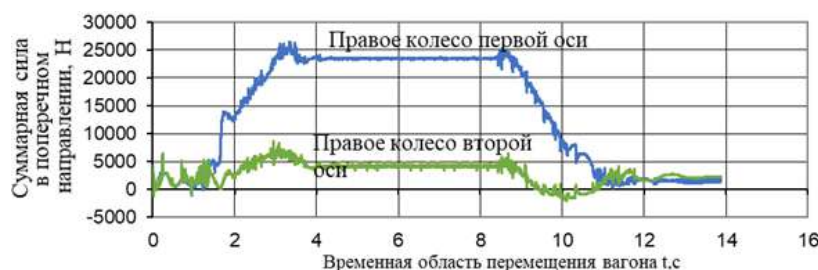
№	Участок Section	Скорость, км/ч Speed, km/h	Осевая нагрузка, кН Axial load, kN	$a_{нп}$ , $\text{м/с}^2$	$K_{дг}$	Рамная сила, кН Frame power, kN
1	Кешево – Таргиз Keshevo – Targiz	55	227,5	0,119	0,18	40,95
2	Нижеудинск – Тайшет Nizhneudinsk – Taishet	78	229,3	0,44	0,249	57,1
3	Касьяновка – Половина Kas'yanovka – Polovina	62	230,3	0,46	0,201	46,3
4	Талдан – Гудачи Taldan – Gudachi	49	230,3	0,29	0,162	37,31
5	Атамановка – Кручина Atamanovka – Kruchina	53	232,5	0,67	0,174	40,45
6	Танхой – Кедровая Tankhoi – Kedrovaya	77	215,8	0,43	0,246	53,1
7	Камарчага – Таежный Kamarchaga – Tazhnyi	46	222,9	0,5	0,153	34,1
8	Залари – Тыреть Zalari – Tyret'	44	230,3	0,34	0,147	33,85
9	Камарчага – Балай Kamarchaga – Balai	50	230,3	0,6	0,165	37,9
10	Делюр – Тыреть Delyur – Tyret'	65	230,0	0,37	0,21	48,36
11	Черная – Среднеилимская Chernaya – Sredneilimskaya	58	230,3	0,95	0,189	43,5
12	Слюдянка – Ангасолка Slyudyanka – Angasolka	51	225,4	0,62	0,168	37,86

следовано более 20 сходов, произошедших на Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД) за 2015–2021 гг. Оказалось, что все эти сходы локализуются на первых 5–20 м переходной кривой, что объясняется рядом особенностей переходных кривых горно-перевальных участков: увеличенной по сравнению с прямыми участками пути шириной колеи, возвышением наружного рельса и значительным (до  $0,95 \text{ м/с}^2$  при максимально допустимом значении  $0,3 \text{ м/с}^2$ ) по величине непогашенным ускорением.

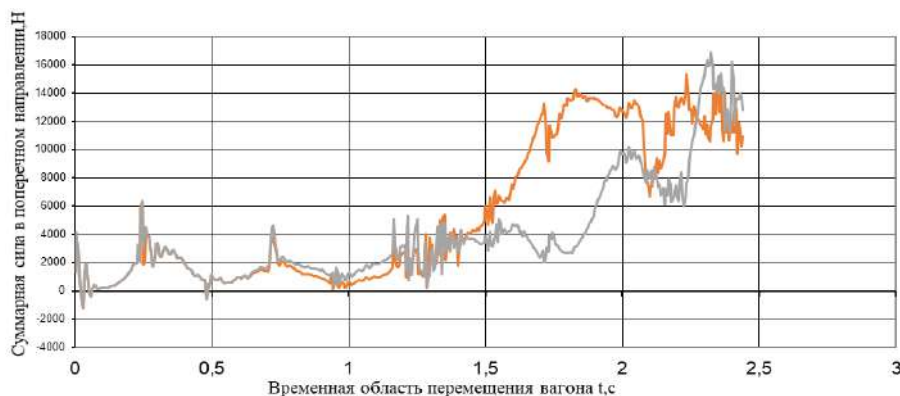
Для процесса эксплуатации существенный интерес представляет оценка опасности непогашенных поперечных ускорений вагонов, ведущих к их сходам. Из представленных результатов следует, что сочетание отклонений возвышения рельса в кривой с превышением скорости представляет собой особую опасность и требует усиления контроля за содержанием пути и скоростным режимом. К опасному также следует отнести сочетание превышения скорости движения и просадки пути. В частности, просадка пути второй-третьей степени приводит, как правило, к сходу при движении с максимально допустимой скоростью. Далее приведены значения основных характеристик движения, соответствующих событию схода вагонов на различных участках ВСЖД (табл.).

Амплитудно-частотная характеристика показывает, что при наличии определенных неисправностей пути и подвижного состава, происходит скачок, указывающий, что большие динамические изменения происходят на малых длинах переходных кривых. На рис. 2 представлен график движения вагонов в кривом участке пути с уширением 0,25. Возникновение силы происходит за 1 с и приводит к сходу.

Максимальное непогашенное ускорение, которое возникало в кривых, наблюдалось при малых длинах переходных кривых и радиусах от 300–650 м с профилем по подъему от 7 до 9‰. При больших положительных значениях непогашенного ускорения крен кузова на рессорах может приблизиться к граничному значению, в случае превышения которого происходит перевалка по пятнику с опиранием кузова на скользуны [10]. Наличие в этих условиях на наружной рельсовой нити односторонней просадки типа впадины или горба, как правило, приводит к опрокидыванию вагона. Отступление в плане различалось длиной волны, которая может варьироваться от минимальных до максимальных значений, сила удара (боковая сила) самая большая при минимальной длине неровности пути (рис. 3).



**Рис. 2.** График динамического движения вагонов в кривом участке пути  
**Fig. 2.** Graph of the dynamic movement of wagons in a curved section of the track



**Рис. 3.** График динамического движения вагонов в кривом участке пути с уширением 0,25  
**Fig. 3.** Graph of the dynamic movement of wagons in a curved track section with a widening of 0.25



При просадке в 25 мм и минимальной длине сила удара настолько высока, что приводит к сходу подвижного состава [11]. При прохождении подвижным составом неровности происходит разгрузка рессорного комплекта, которая вызывает колебания кузова, вследствие чего повышается нагрузка на наружный рельс. Это оказывает существенное влияние на величину и характер поперечных сил, действующих на подвижной состав, в данном случае они в 1,5–2 раза больше нормативных. Влияние односторонней просадки намного опаснее, чем двух параллельно расположенных, особенно во внутреннем рельсе, когда происходит дисбаланс колесных пар в тележке и зазор между колесом и рельсом увеличивается в 2 раза. Это приводит к обезгруживанию одной стороны вагона и увеличивает нагрузку на внутренний рельс, создавая дополнительную вертикальную нагрузку и большие поперечные силы.

Между значениями динамических добавок рамных и боковых сил, возникающих на набегающем колесе, существует тесная связь. Следовательно, можно рассматривать только влияние отступлений по уровню на динамические добавки рамных сил первой оси тележки (рис. 4).

Характер износа колес и галопирование (колебание кузова вокруг поперечной оси, проходящей через центр тяжести) обусловлены неодинаковым прогибом рессорного подвешивания передней и задней тележек подвижного состава и определяется не только дефектами поверхности катания колесных пар, но и харак-

теристикой пути, количеством кривых и переходных кривых, на которых преимущественно обращался данный подвижной состав. Так как вползание колеса на рельс происходит при совпадении боковых сил, действующих на колесную пару, с разгрузкой набегающего колеса вследствие колебаний кузова на рессорах, необходимо установить тип рессорного подвешивания:

– линейное рессорное подвешивание с уменьшенной жесткостью во всем рабочем диапазоне нагрузок;

– билинейное подвешивание, в котором в порожнем режиме работает только часть пружин (наружные пружины в комплектах, расположенных под надрессорной балкой), а в груженом режиме в работу включаются все пружины комплекта.

В линейном рессорном подвешивании работают все пружины, так как в комплекте используются одинаковые по высоте пружины. Однако увеличенная гибкость подвешивания приводит к повышению напряжения в пружинах и уменьшению их усталостной прочности. В линейном подвешивании степень демпфирования и связность боковин тележки пропорциональны статической нагрузке, что приводит к уменьшению критической скорости, при которой возникает виляние, особенно в случае износа клиновой системы.

В билинейном подвешивании напряжение в пружинах под полной статической



Рис. 4. Взаимосвязь скоростного режима с рамной силой  
Fig. 4. Relationship between speed and frame strength

нагрузкой меньше и их усталостная прочность выше. Подклиновые пружины имеют более жесткую линейную характеристику, в порожнем режиме на клиновую систему приходится большая доля нагрузки, чем в груженом. Это приводит к увеличению относительного трения гасителя колебаний рессорного подвешивания и связности боковин, что позволяет повысить критическую скорость порожних вагонов.

В конце 1990-х гг. была проведена модернизация отдельных узлов и деталей тележки 18-100, направленная на повышение ее работоспособности. В связи с этим следовало рассмотреть вопрос о снятии ограничений на допускаемые скорости движения, в соответствии с которыми скорость ограничивалась в зависимости не от состояния ходовой части, а от сочетания неровностей пути. Считали, что при установлении этих ограничений интенсивные колебания вагонов возбуждаются неблагоприятным сочетанием отступлений пути, которые при улучшении состояния ходовой части в результате проведенной модернизации и увеличения гибкости подвешивания, должны уменьшиться до безопасной величины.

Уменьшение трения в рессорных комплексах тележки до 50 % и менее приводит к существенному усилению колебаний кузова, что вызывает увеличение  $K_d$  примерно в 1,5 раза. Рамная сила  $H_p$  в долях осевой нагрузки  $H_p / p_0$  составляет примерно 0,09–0,31 при норме 0,4 (см. рис. 4). При движении со скоростями 60–80 км/ч в кривой радиусом 300–650 м с сочетанием неровностей пути перекося отклонения в плане и просадка увеличивают показатели рамных сил, коэффициентов вертикальной динамики обрессоренных и необрессоренных частей вагона. Для выявления влияния на динамические качества вагонов, оборудованных рессорным подвешиванием в различных вариантах, в соответствии с дополнительными требованиями к отступлениям в пути, в кривых при расследовании сходов на одном участке:

- перекося 24 мм (количество на одном участке – 13) – II степень отступления;
- просадка 20 мм (количество на одном участке – 8) – II степень отступления;
- сужение от 6–15 мм количество на одном участке – 7) – II степень отступления;
- уширение от 6–15 мм (количество на одном участке – 20) – II степень отступления;
- рихтовка 16 мм (количество на одном

участке – 1) – II степень отступления;

- перекося 25 мм (количество на одном участке – 14) – III.

Проведенные расчеты необрессоренных частей тележки (боковая рама, буксовый узел, колесная пара) показали увеличение вертикального непогашенного ускорения до величины 1,14–1,61 (при норме 0,98), что привело к дисбалансу колесной пары. При этих значениях наступает потеря устойчивости вагона, так как дополнительное ускорение увеличивает его колебания, которые приводят к опасным последствиям.

Для расчета динамических и остаточных смещений пути с деревянными шпалами и костыльными скреплениями использована имитационная модель. Предполагается, что зависимость сопротивления боковых граней подошвы при кручении от вертикальных перемещений рельса линейна до определенных пределов, после чего начинает происходить вырывание костылей, при котором противодействующее усилие можно считать постоянным. В горизонтальной плоскости силы, противодействующие поперечному смещению подошвы, существенно нелинейны, так как рельс опирается на металлические подкладки. Между ребрами подкладок и боковыми гранями подошвы может быть зазор, в пределах которого рельс смещается, вызывая противодействующую силу трения по подошве с коэффициентом трения в паре «сталь по стали».

Подкладка после выбора зазора в ее ребрах может перемещаться по шпале, и на нее также действуют силы сухого трения (в данном случае сухое трение в паре «сталь – дерево» почти вдвое превышает трение в системе рельс – подкладка). Это будет происходить, пока не исчерпаются зазоры в системе «подкладка – костыль – шпала», которые складываются из зазоров в костыльных отверстиях и люфтов, образующихся в результате деформации смятия материалы шпалы. Последнюю можно разделить на деформацию, которая возникает уже при первоначальных нагрузках на древесину, и накопленную после многократных воздействий даже в случае ее работы в упругой зоне.

При работе костылей под переменной нагрузкой, в том числе и в зоне линейных деформаций древесины, появляются остаточные деформации. По результатам исследований, проведенных лабораторией шпального хозяй-

ства Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, деформация древесины шпалы под пульсирующей нагрузкой, равной 12,5 кН на костыль, в течение первых 10 тыс. циклов при работе в упругой зоне  $\delta = 3 \cdot 10^{-6}$  [12].

Если нагрузки превышают некоторый предел для материала шпалы, можно считать, что смещение подкладки развивается при постоянном сопротивлении древесины и остаточные деформации соответствуют максимальным за пределами упругой зоны [13]. В пределах люфтов каждая рельсовая нить вне зоны анкилоза (застоя) перемещается по шпале под воздействием внешних нагрузок независимо, и лишь, когда выбраны люфты, вся система «рельс – подкладка – шпала» работает как одно целое.

Данная зависимость с точностью до 15 % позволяет оценить рамные силы для кривой, имеющей радиус 300–650 м, в диапазоне скоростей 60–80 км/ч при перекосах от 6 до 20 мм. Колебания боковой качки приводят к возникновению динамических добавок рамных сил на первой оси. В этих условиях для аппроксимации пригодна следующая эмпирическая зависимость:  $\Delta H = 1,5h$ , которая с достаточной точностью отображает изменение рамной силы на просадке глубиной 5–20 мм.

Аналогично возникновение колебаний при прохождении неровности наблюдается в случае уменьшения силы трения в рессорных комплектах. Ухудшение демпфирования, вызванное износами в рессорных комплектах, при движении подвижного состава со скоростями 60–80 км (скорости при расследовании сходов) независимо от формы просадки приводит к дополнительному крену кузова, в результате чего возникают большие поперечные силы, которые могут быть определены как  $\Delta H = 1,5h$ .

Моделирование взаимодействия подвижного состава и неровности в круговой кривой происходит в известной мере со стабильными начальными условиями, и разброс показаний определяется только влиянием изменений параметров в системе. В прямых участках пути процесс существенно сложнее: при движении со скоростью выше критической, колебания влияния вагона накладываются на колебания,

обусловленные неровностями пути.

При моделировании, проводимом для выявления влияния амплитуды и степеней неровностей на динамические процессы взаимодействия подвижного состава и пути, было выявлено, что каждый раз неровность была с различными параметрами [15]. Внешней дополнительной силой, воздействующей на экипаж в кривой, является центробежная сила. Она прижимает экипаж к наружной рельсовой нити, перегружая ее и увеличивая сопротивление движению экипажа, что ускоряет износ наружного рельса. В сочетании с сильным боковым ветром того же направления центробежная сила может привести к опрокидыванию вагона [16]. Боковые силы в кривых могут достигать таких величин, при которых рельсовые нити вместе с подкладками сдвигаются со своих мест на шпалах или происходит «отбой» наружной рельсовой нити, что приводит к уширению колеи. Кроме того, могут сдвигаться рельсы вместе со шпалами, искажая положение колеи в плане [17].

В прямых участках процесс существенно сложнее: при движении со скоростью выше критической колебания влияния вагона накладываются на колебания, обусловленные неровностями пути. Амплитудно-частотная характеристика показывает, что при наличии определенных неисправностей пути и подвижного состава, происходит скачок, указывающий, что большие динамические изменения происходят на малых длинах переходных кривых.

## Заключение

Представленные результаты моделирования зависят от состояния пути, радиуса кривой и скорости движения. Для более глубокого анализа используют и многие другие характеристики вагона, пути и локомотива. Данный метод позволяет оценить изменение параметров движения в совокупности с изменениями продольных и вертикальных сил во времени. Динамические добавки рамных сил по второй оси примерно в 1,5 раза меньше, чем по первой, а для боковой силы на набегавшем колесе меньше, чем для рамной на 2–3 кН, поскольку часть рамной силы приходится на ненабегавшее колесо, что существенно влияет на безопасность движения [18].

## 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. Мямлин С.В. Моделирование динамики рельсовых экипажей. М. : Новая идеология, 2002. 240 с.
17. Кузович В.М. Динамическая нагруженность специализированных вагонов в криволинейных участках пути : дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 211 с.
18. Маджидов Ф.А. Оценка параметра безопасности грузового вагона и управление эффективностью его использования с учетом изменения параметров эксплуатационной среды // Безопасность движения поездов : материалы XVII науч.-практ. конф. М. : 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. Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava [Interaction of path and rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1986. 558 p.
3. Zhelnin 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: mezhdistiplinarnye 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, 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. Myamlin S.V. Modelirovanie dinamiki rel'sovykh ekipazhei [Modeling the dynamics of rail vehicles]. Moscow: Novaya ideologiya Publ., 2002. 240 p.

17. Kuzovich V.M. Dinamicheskaya nagruzhennost' spetsializirovannykh vagonov v krivolineinykh uchastkakh puti [Dynamic loading of specialized wagons in curved sections of the track]. Ph.D's thesis. Moscow, 2010. 211 p.

18. Madzhidov F.A. Otsenka parametra bezopasnosti gruzovogo vagona i upravlenie effektivnost'yu ego ispol'zovaniya s uchetom izmeneniya parametrov ekspluatatsionnoi sredy [Estimation of the safety parameter of a freight car and management of the efficiency of its use, taking into account changes in the parameters of the operating environment]. *Materialy XVII Nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bezopasnost' dvizheniya poezdov»* [Proceedings of the XVII Scientific and Practical Conference «Train Traffic Safety»]. Moscow, 2016, pp. 96-98.

#### **Информация об авторах**

*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.

## **Анализ влияния пропуска длинносоставных поездов на участке железнодорожного пути на качественные показатели графика движения поездов и безопасность перевозочного процесса**

**В.А. Оленцевич✉, Н.В. Власова, Е.В. Каимов**

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

✉olencevich\_va@mail.ru

### **Резюме**

Целью представленного научного исследования является технико-экономическая оценка направлений по повышению эффективности функционирования участков железнодорожного пути Восточного полигона, увеличению пропускной способности при соблюдении условий обеспечения безопасности движения поездов и минимизации затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание подвижного состава и инфраструктуры на основе организации движения посредством увеличения веса и длины грузовых поездов на восточном направлении. Использование составов большой длины позволяет получить ряд важных преимуществ. В условиях цифровой трансформации железнодорожной отрасли альтернативным решением является внедрение инновационных технологий, которые в ближайшем будущем определят развитие магистральных железнодорожных перевозок в глобальном масштабе. Международная ассоциация тяжеловесного движения представила проект «Развитие концепции тяжеловесных перевозок в рамках четвертой промышленной революции – видение 2030 года». Такого рода решения определяют эффективность и безопасность железнодорожных перевозок, обеспечивают пропускную способность железных дорог с использованием современных подходов. Авторами рассмотрена работа участка Восточного полигона железных дорог при пропуске длинносоставных поездов по двум вариантам: 20 поездов в четном направлении движения и 15 в нечетном; 26 поездов в четном направлении движения и 25 в нечетном. В статье дается оценка влияния принципа организации пропуска длинносоставных поездов на качественные показатели графика движения, что позволило определить параметры их применения, а также на безопасность перевозочного процесса в целом.

### **Ключевые слова**

пропускная способность участка железнодорожной линии, длинносоставный поезд, график движения поездов, безопасность движения поездов, инфраструктурный комплекс, Восточный полигон, верхнее строение железнодорожного пути

### **Для цитирования**

Оленцевич В.А. Анализ влияния пропуска длинносоставных поездов на участке железнодорожного пути на качественные показатели графика движения поездов и безопасность перевозочного процесса / В.А. Оленцевич, Н.В. Власова, Е.В. Каимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 149–158. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).149-158.

### **Информация о статье**

Поступила в редакцию: 2.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 12.09.2022 г.; принята к публикации: 14.09.2022 г.

## **Analysis of the impact of the long-distance trains passage in a railway track section upon the quality indicators of the train schedule and the safety of the transportation process**

**V.A. Olentsevich✉, N.V. Vlasova, E.V. Kaimov**

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

✉olencevich\_va@mail.ru

### **Abstract**

The purpose of the presented scientific research is a technical and economic assessment of the ways for improving the efficiency of the railway sections functioning at the Eastern Polygon, increasing the capacity level subject to ensuring the safety of train traffic and minimizing the costs of operation and maintenance of rolling stock and infrastructure based on the organization of traffic by increasing the weight and length of freight trains in the eastern direction. The use of long-composite trains allows you to get a number of important advantages. Under the ongoing digital transformation of the railway industry, an alternative solution is the introduction of innovative technologies that will determine the development of mainline rail transport on a global scale in the near future. The International Heavyweight Movement Association presented the project «Development of the concept of heavy duty transportation within the framework of the Fourth Industrial Revolution - Vision 2030». Such solutions determine the efficiency and safety of the railway transportation and provide the capacity of railways using modern approaches. The authors

considered the operation of the railway line section of the Eastern polygon of railways when passing long-haul trains in two variants: 20 trains in even and 15 in odd directions of movement; 26 trains in even and 25 in odd directions of movement. An assessment is given of the influence of the organization principle of the long-distance trains passage on the quality indicators of the train schedule and the safety of the transportation process, which made it possible to determine the criteria for their use.

### Keywords

capacity of a section of a railway line, a long composite train, train schedule, train safety, infrastructure complex, Eastern polygon, upper structure of the railway track

### For citation

Olenetsevich V.A., Vlasova N.V., Kaimov E.V. Analiz vliyaniya propuska dlinnosostavnykh poezdov na uchastke zheleznodorozhnogo puti na kachestvennyye pokazateli grafika dvizheniya poezdov i bezopasnost' perevochnogo protsessa [Analysis of the impact of the long-distance trains passage in a railway track section upon the quality indicators of the train schedule and the safety of the transportation process]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 149–158. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).149-158.

### Article Info

Received: September 2, 2022; Revised: September 12, 2022; Accepted: September 14, 2022.

### Введение

В связи с новыми подходами к организации и функционированию транспортного рынка, изменениями принципов работы большинства отраслей экономики Российской Федерации 2022-й стал годом преодоления непредвиденных трудностей, поиском новых возможностей, принятия нестандартных управленческих решений. Хочется отметить, что именно железнодорожная транспортная система максимально четко продемонстрировала, насколько такое влияние может быть различным, а фундаментальные общемировые негативные принципы послужить стартовой площадкой для формирования новых, перспективных точек роста большинства структурных подразделений отрасли.

При суммарном снижении величины грузопотока по сети ОАО «РЖД» Восточный полигон показывал значительный прирост, прежде всего за счет транзитного грузопотока. Собственные объемы погрузки предприятий, работающих в Красноярском крае, Иркутской области и Республике Бурятия, снизились на 7 %, при этом угольная сфера, лесоперерабатывающая отрасль сумели нарастить величину отправки с использованием железнодорожного транспорта. В итоге грузооборот по Восточному полигону в целом на 1 сентября 2022 г. увеличился уже на 1,7 %. Согласно прогнозным значениям, холдинг ОАО «РЖД» по итогам 2022 г. планирует перевезти по сети более 1,3 млрд т грузов, что на 2,4 % превышает показатели 2021 г. Ожидается рост объемов по грузам всех категорий, за исключением высококодированных [1, 2].

В создавшихся условиях необходимо разрабатывать и активно внедрять новые подходы к организации движения поездов на участках железнодорожных линий, особое внимание уделять модернизации инфраструктурного комплекса железнодорожных станций с целью прироста грузопотока, улучшения качественных показателей графика движения поездов при условии соблюдения принципов безопасности перевозочного процесса [3].

### Актуальность задачи по повышению веса и длины грузовых поездов на восточном направлении

На сегодняшний день динамично развивающимся сегментом грузовых перевозок, позволяющим обеспечить стабильный доход и прибыль ОАО «РЖД», являются контейнерные перевозки. Их быстрое развитие происходит в первую очередь за счет организации контейнерных поездов.

Согласно показателям графика движения поездов Восточного полигона железных дорог на 2021–2022 гг., всего выделено 708 «ниток» контейнерных поездов, в том числе 208 – своего формирования, 215 – транзитных, 285 – заканчивающихся в границах дороги, на унифицированную длину 71 условный вагон в соответствии с возможностями инфраструктуры. За семь месяцев 2022 г. передача контейнерных поездов к аналогичному периоду прошлого года по стыку Юрты Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД) увеличена на 10 %, по стыку Петровский Завод снижена на 6 % [1, 2].

Средний состав объединенного контейнерного поезда составляет 119 вагонов в нечет-

ном направлении, 122 вагона в четном направлении. Динамика маршрутного движения ускоренных контейнерных поездов направлением запад – восток с начала года составляет +149,79 км/сут. (117,9 % к уровню прошлого года) [4–6].

Длина контейнерных поездов, формируемых в настоящее время на станциях ВСЖД, составляет 57–65 условных вагонов. Взаимная интеграция разрозненных форматов коммуникаций с клиентами в единую систему должна составлять, согласно проведенным техническим расчетам, не менее 130 вагонов, что позволит в значительной мере повысить пропускную и перерабатывающую способности инфраструктурного комплекса Восточного полигона, снизить затраты на организацию перевозочного процесса [1, 2, 4, 5].

На сегодняшний день в рамках функционирования инфраструктурного комплекса ВСЖД имеется 17 приемоотправочных путей, позволяющих формировать и пропускать контейнерные поезда длиной более 130 вагонов, из них 12 в нечетном направлении движения, 5 – в четном [4, 6].

Обеспечение продольной стабилизации железнодорожного пути в условиях интенсификации работы ОАО «РЖД», повышение веса и длины грузовых поездов, осевых нагрузок подвижного состава, грузоподъемности и статической нагрузки грузовых вагонов, скоростей движения поездов – все это является очень актуальной задачей. Организация движения с использованием тяжеловесных и длинносоставных поездов предполагает применение интенсивного пневматического и рекуперативного торможения, а также сосредоточение на малой длине большого количества единиц тяги. Усложнение условий эксплуатации отражается на стабильности железнодорожного пути и требует принятия дополнительных мер для недопущения угона, соблюдения принципов безопасности перевозочного процесса [7, 8].

Необходимо учитывать тот факт, что в работе структурных подразделений путевого хозяйства, энергоснабжения, связи, локомотивного и вагонного хозяйств, диспетчерских служб, обеспечивающих бесперебойное функционирование перевозочного процесса, устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) при увеличении длины грузового поезда и пропуске длинносоставных поездов

возникают определенные технические и организационные проблемы.

Кроме того, длинносоставные грузовые поезда достаточно сложно технологически включить в график движения поездов на участках: в ряде случаев такая организация движения приводит к съему грузовых поездов стандартного веса и длины или вызывает их задержку от установленного срока на достаточно длительное время. «Длинные» поезда следуют через большое количество железнодорожных станций и отдельных пунктов, не имея на них остановки, поскольку длина приемоотправочных путей данных структурных подразделений не предусмотрена для размещения составов повышенной длины. Тяговое плечо функционирования локомотивного парка увеличивается, как и сам участок работы локомотивной бригады, усложняется технология по формированию таких составов и возрастает время на выполнение данных технологических операций в рамках имеющейся инфраструктуры [9–11].

Организация пропуска длинносоставных поездов на участках железнодорожных линий Восточного полигона в большинстве случаев требует разработки и внедрения проектов реконструктивных мероприятий на технических станциях смены локомотивов и локомотивных бригад и станций обгона тяжеловесных поездов пассажирскими, удлинения приемоотправочных путей, реконструкции горловин станций, системы водоотводов, систем СЦБ и связи и т. д. [12].

Другой актуальной задачей по повышению веса и длины грузовых поездов на восточном направлении движения для составов длиной 100 условных вагонов и выше является увеличение времени воздействия подвижного состава на железнодорожный путь. Сопоставление значений данного показателя у длинносоставного поезда и поезда, имеющего стандартную длину и вес, указывает на его увеличение в отдельных случаях на 32 %. Данный фактор вызывает ряд негативных последствий:

1. Поскольку длинносоставный поезд имеет большее количество осей, наблюдается больший боковой износ рельсов на кривых участках пути.

2. В нижнем и верхнем строении пути присутствует повышенная концентрация напряжений, которые локализуются в местах существующих или зарождающихся дефектов, что



способствует их ускоренному развитию и, как следствие, появлению сложных деформаций.

3. Железнодорожный путь после контакта с длинносоставным поездом, согласно техническим параметрам, в результате возникающего напряжения часто не восстанавливает свое исходное состояние до момента контакта со следующей подвижной единицей.

При ряде существующих проблем пропуск объединенных длинносоставных контейнерных поездов (составностью более 130 условных вагонов) позволяет сократить эксплуатационные расходы отрасли, в значительной мере снижает нагрузку на инфраструктуру и увеличивает пропускную и провозную способности участков на грузонапряженных направлениях Восточного полигона [13–15].

Технологии тяжеловесного и длинносоставного движения являются инструментом повышения провозной способности железных дорог и одним из значимых резервов повышения энергоэффективности перевозочного процесса. Однако стремительное развитие цифровых технологий открывает новые возможности для увеличения пропускной способности за счет сокращения интервалов между поездами, оптимизации сортировочных работ на станциях и повышения регулярности следования поездов. Дополняя, а иногда и заменяя тяжеловесное движение, цифровые продукты способны заметно повысить эффективность перевозочного процесса и его экологичность без вложений в традиционную инфраструктуру [16].

Обращаясь к зарубежному опыту, следует отметить, что в разных странах развитие тяжеловесного движения имеет свою специфику в зависимости от научно-технического развития, экономических возможностей, климатических и геологических условий. Эффективное решение проблемы износа пути и подвижного состава было предложено в Австралии [16, 17]. В целях предотвращения износа железнодорожного пути и обеспечения сохранности подвижного состава разработана концепция специализированной железной дороги, которая основана на следующих положениях:

1. Использование подвижного состава одного и того же типа с постоянной осевой нагрузкой, так как допускаемая величина осевой нагрузки выбирается в зависимости от типа рельсов, эпюры шпал и рода балласта.

2. Предъявление жестких требований к надежности работы однопутной линии для формирования специализированной железнодорожной линии с использованием более экономичных и мощных локомотивов, рельсов и колес с более высокой износостойкостью и устойчивостью к повреждениям, а также более совершенной технологии сварки рельсов.

Повышение пропускной способности американскими железнодорожными компаниями по перевозке тяжелых грузов достигнуто путем перехода с минимальной осевой нагрузки на максимально возможную, а также увеличением длины и веса грузовых поездов за счет применения вагонов из облегченных сплавов, что позволило осуществить погрузку большей массы грузов [14–19].

С 2021 г. ОАО «РЖД» принят и успешно реализуется комплекс мер по модернизации инфраструктуры крупных сортировочных станций Восточного полигона:

- проектные решения, направленные на увеличение длины сортировочных путей;
- частичная реконструкция и изменение технологии работы парков станций;
- полная или частичная автоматизация систем управления сортировочными работами;
- исключение человеческого фактора при работе на сложных участках сортировочных станций.

Реализация представленных мер будет способствовать приросту размеров маршрутизации грузовых перевозок, усилению сортировочной работы, концентрации сортировочных операций на меньшем количестве высокооснащенных станций.

В настоящее время на большинстве железных дорог увеличение длины грузовых поездов вызывает потребность в реконструктивных мероприятиях, связанных с удлинением станционных путей. Одним из аспектов данной проблемы является удлинение станционных путей на промежуточных станциях и обгонных пунктах, где будет производиться обгон длинносоставных грузовых поездов пассажирскими. Если на железнодорожном участке нет ни одной промежуточной станции с достаточной емкостью приемоотправочных путей для приема и отправления длинносоставных грузовых поездов, то пропускать по участку такие грузовые поезда необходимо без остановок. При большом количестве пассажирских поездов, которые необхо-

димо пропустить по участку, отправлять впереди него длинносоставный грузовой поезд неприемлемо, так как обогнать его не будет возможности. Учитывая перспективу увеличения длинносоставного поездопотока на восточном направлении, необходимо повышать пропускную способность участков, а сделать это можно только за счет реконструктивных мероприятий, наращивая емкость путевого развития промежуточных станций.

Проведенный авторами анализ инфраструктурных комплексов по отдельным железнодорожным станциям ВСЖД (Тайшет, Нижнеудинск, Перевоз (предузловая станция Зима), Тыреть (предузловая станция Зима), Мегет (предузловая станция Иркутск-Сортировочный), Большой Луг, Слюдянка II, Дивизионная (предузловая станция Улан-Удэ), Тальцы (предузловая станция Улан-Удэ)) позволил установить целесообразность разработки и технико-экономического обоснования ряда проектных решений реконструктивного характера с учетом развития вспомогательных (технических, предузловых) железнодорожных станций ОАО «РЖД» во взаимосвязке с развитием припортовых узлов и полигонов сети.

### **Анализ влияния пропуска длинносоставных поездов на участке железнодорожного пути на качественные показатели графика движения поездов и безопасность перевозочного процесса**

Повышение пропускной способности железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона железных дорог в условиях постоянно возрастающих объемов перевозок является особенно актуальной проблемой. В научной статье авторами рассматриваются технологические решения оптимизации графика движения поездов при пропуске длинносоставных поездов и их влияние на качественные показатели работы участка железнодорожной линии.

Рассмотрена работа участка Иркутск-Сортировочный – Тайшет Восточного полигона железных дорог при пропуске длинносоставных поездов с учетом следующих факторов:

- текущие размеры движения;
- объем 20 поездов в четном направлении движения и 15 в нечетном;
- объем 26 поездов в четном направлении движения и 25 в нечетном;

– объем 30 поездов в четном направлении движения и 30 в нечетном.

Согласно установленной технологии работы участка с грузовыми поездами, в пути следования производится смена локомотивных бригад, опробование тормозов на железнодорожных станциях Нижнеудинск и Зима. Поскольку грузовые длинносоставные поезда имеют длину состава, превышающую вместимость приемоотправочных путей паков железнодорожных станций Нижнеудинск и Зима, обработка таких поездов на данных раздельных пунктах рассмотрена наглядно построением суточных планов-графиков работы соответствующих станций. Организация движения длинносоставных поездов осуществляется пакетным графиком с межпоездным интервалом 11 мин.

Наличная пропускная способность при параллельном графике движения поездов определяется по формуле (1):

$$N = \frac{(1440 - t_{\text{тех}})}{l} \alpha \quad (1)$$

где  $t_{\text{тех}}$  – временной промежуток, свободный от пропуска поездов, предназначенный, согласно технологии работы участка, для выполнения работ по текущему содержанию и ремонту железнодорожного пути или других технических устройств, предусмотренный графиком движения;  $\alpha$  – вспомогательный коэффициент учета степени надежности функционирования технических средств до отказа, равный 0,96.

Наличная пропускная способность рассматриваемого участка при действующем техническом оснащении [20]:

$$N_{\text{неч}} = \frac{(1440 - 120)}{10} \cdot 0,96 = 126 \text{ поездов};$$

$$N_{\text{чет}} = \frac{(1440 - 120)}{10} \cdot 0,96 = 126 \text{ поездов}.$$

Потребная пропускная способность определяется по формуле (2):

$$N_{\text{потр.}} = \beta_{\text{рез.}} [N_{\text{гр}} + \varepsilon_{\text{п}} \cdot N_{\text{пас}} + \varepsilon_{\text{пр}} \cdot N_{\text{пр}} + N_{\text{сб}} \cdot (\varepsilon_{\text{сб}} - 1)], \quad (2)$$

где  $\beta_{\text{рез.}}$  – величина резерва пропускной способности для двухпутных линий;  $N_{\text{гр}}$ ,  $N_{\text{пас}}$ ,  $N_{\text{пр}}$ ,  $N_{\text{сб}}$  – потребное количество, соответственно, грузовых, пассажирских, пригородных и сборных поездов;  $\varepsilon_{\text{п}}$ ,  $\varepsilon_{\text{пр}}$ ,  $\varepsilon_{\text{сб}}$  – коэффициенты съема грузовых поездов, соответственно, пассажирскими, пригородными и сборными поездами.

Потребная пропускная способность на рассматриваемом участке:

$$N_{\text{потр}}^{\text{чет}} = 1,15 \cdot [85 + 1,3 \cdot 9 + 1,5 \cdot 2 + 2 \cdot (2,5 - 1)] = 118 \text{ поездов.}$$

$$N_{\text{потр}}^{\text{неч}} = 1,15 \cdot [87 + 1,3 \cdot 11 + 1,5 \cdot 2 + 2 \cdot (2,5 - 1)] = 123 \text{ поезда.}$$

По результатам проведенных расчетов можно сказать, что уровень потребной пропускной способности рассматриваемого участка меньше, чем полученное значение наличной. Следовательно, имеющаяся инфраструктура и действующее техническое оснащение позволяют бесперебойно освоить заданные размеры движения.

В период пропуска длинносоставных поездов на рассматриваемом участке железнодорожной линии происходит существенное сокращение размеров движения, а также изменение показателей графика движения поездов, таких как участковая, техническая скорости, количество локомотивных бригад, коэффициент участковой скорости [20, 21].

Итоговая ведомость пропуска грузовых поездов на рассматриваемом участке по вариантам организации движения представлена в табл. 1.

Значения показателей графика движения поездов на рассматриваемом участке с учетом пропуска длинносоставных поездов при различных вариантах организации движения, а также результаты технической и экономической оценки изменения показателей представлены в табл. 2.

Введение в обращение на рассматриваемом участке поездов повышенной длины приводит к снижению количества ниток поездов на графике движения, но при этом вызывает повышенную нагрузку на устройства электрооборудования, участвующие в передаче тяговой электроэнергии (рис.).

Тяговыми расчетами предусматривается проверка значения веса поезда на трогание с места при условии эффективной работы устройств тягового электроснабжения на расчетном подъеме поездным локомотивом после вынужденной остановки поезда. По итогам проведенных тяговых расчетов можно сделать вывод, что все серии локомотивов, имеющих обращение на заданном участке с соответствующими им весовыми нормами, проследуют инфраструктуру беспрепятственно. Температура тяговых электродвигателей не превышает заданного значения (120 °С) по классу изоляции.

Согласно проведенным расчетам, пропускная способность рассматриваемого участка составила 118 поездов в четном направлении движения и 123 поезда в нечетном. При учете пропуска длинносоставных поездов по вариантам суммарные финансовые потери составили соответственно 32,306; 44,876; 61,133 млн руб. в год [22].

## Заключение

**Таблица 1.** Итоговая ведомость пропуска грузовых поездов по участку железнодорожной линии  
**Table 1.** The final statement of the passage of freight trains along the section of the railway line

Направления движения поездов на участке Directions of train movement on the section	Поездо-минуты, мин. Train-minutes, min		Поездо-часы, час Train-hours, h		Поездо-километры, км Train-kilometers, km
	В движении In motion	В пути следования On the way	В движении In motion	В пути следования On the way	
При объеме 20 поездов в четном направлении движения и 15 в нечетном With 20 trains in even direction and 15 in odd direction					
Четное Even	48 248,00	59 776,00	804,13	996,26	41 829,30
Нечетное Odd	46 587,00	58 220,00	776,45	970,30	42 611,00
При объеме 26 поездов в четном направлении движения и 25 в нечетном With 26 trains in even direction and 25 in odd direction					
Четное Even	48 399,00	60 321,00	806,65	1 005,35	41 829,30
Нечетное Odd	46 993,00	58 642,00	783,22	977,36	42 611,00
При объеме 30 поездов в четном направлении движения и 30 в нечетном With 30 trains in even direction and 30 in odd direction					
Четное Even	49 129,00	61 115,00	811,12	1 159,11	41 829,30
Нечетное Odd	47 103,00	59 021,00	803,31	989,02	42 611,00

**Таблица 2.** Оценка влияния принципа организации пропуска длиннооставных поездов на участке железнодорожной линии на качественные показатели графика движения

**Table 2.** Assessment of the influence of the organizing principle of the long trains passage at the section of the railway line on the qualitative indicators of the traffic schedule

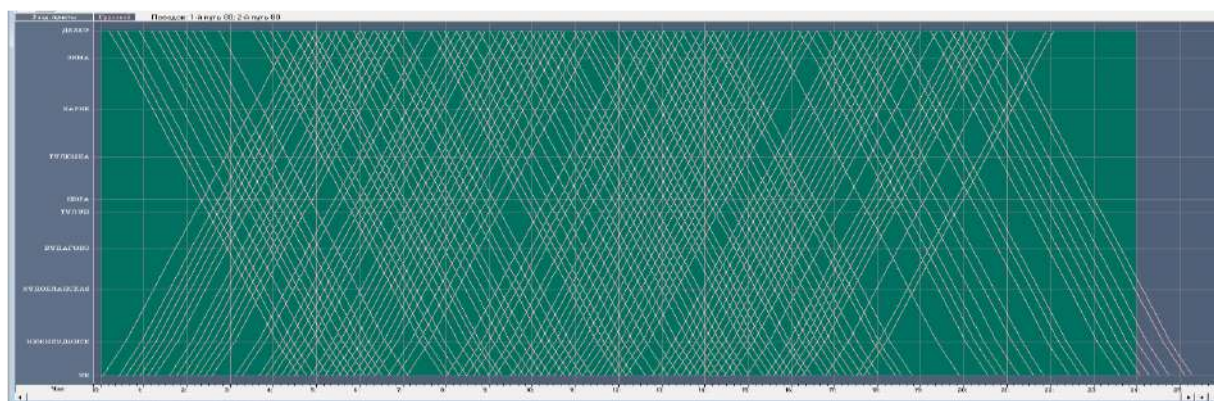
Показатель графика движения поездов Train schedule indicator	Значение показателя графика движения поездов при объеме пропуска длиннооставных поездов по направлениям движения The value of the indicator of the train schedule under the passage volume of long trains trains movements to destinations				Техническая оценка изменения показателей графика движения поездов Technical evaluation of changes in train traffic schedule indicators			Экономическая оценка изменения показателей графика движения поездов, тыс. руб. Economic evaluation of changes in train schedule indicators		
	Текущий график (ГДПО)	20 поездов в четном и 15 в нечетном (ГДП1)	26 поездов в четном и 25 в нечетном (ГДП2)	30 поездов в четном и 30 в нечетном (ГДП3)	ГДП1 к ГДПО TTS1 to TTS2	ГДП2 к ГДПО TTS2 to TTS0	ГДП3 к ГДПО TTS3 to TTS0	ГДП1 к ГДПО TTS1 to TTS0	ГДП2 к ГДПО TTS2 to TTS0	ГДП3 к ГДПО TTS3 to TTS0
Участковая скорость, км/ч Sector speed, km/h	43,52	42,94	42,58	41,73	-0,58	-0,94	-1,79	-1,824	-2,154	-3,628
Техническая скорость, км/ч Technical speed, km/h	53,72	53,42	53,11	52,83	-0,32	0,61	-0,86	-1,713	-2,008	-2,841
Коэффициент участковой скорости Sector speed coefficient	0,81	0,80	0,80	0,81	0,01	-	0,01	-	-	-
Основное время вождения поезда по участку, ч The main time of driving the train on the site, h	29,32	31,4	32,85	33,16	-2,08	-3,53	-3,84	-123,025	-402,328	-479,396
Расчетный оборот локомотивной бригады, ч Estimated locomotive crew turnover	31,12	32,85	33,26	33,98	-1,73	-2,14	-2,14	-8,254	-11,305	-12,005
Эксплуатационный оборот, ч Operating turnover, h	113,6	115,3	116,9	117,2	-1,7	-3,3	-3,6	-7,355	-10,411	-12,806
Потребное число локомотивных бригад, шт. Required number of locomotive crews, piece	212	215	217	220	-3	-5	-8	-31,255	-45,820	-68,201
Годовой экономический ущерб от пропуска длиннооставных поездов, млн руб. Annual economic loss from the passage of long trains								32,306	44,876	61,133

Примечание: ГДП – график движения поездов.

Note: TTS - train schedule.

Результаты технико-экономической оценки направлений по повышению эффективности функционирования участков железнодорожных линий Восточного полигона, увеличению пропускной способности при соблюдении

условий обеспечения безопасности движения поездов на основе организации движения длиннооставных грузовых поездов в четном и нечетном направлениях показали неэффективность данного технического решения.



Вариантный график движения поездов с интервалом 10 минут  
Variant train schedule with an interval of 10 minutes

Значения показателей графика движения поездов на рассматриваемом участке с учетом пропуска длиннооставных поездов при различных вариантах организации движения ухудшились, годовой ущерб при увеличении количества поездов данного типа на 20 % составил 32,3 млн руб., при увеличении на 50 % ущерб достиг 61 млн руб. Пропускная способность участка также снизилась на 7,1 % за счет дополнительного простоя поездов в ожидании пропуска и операций по формированию / расформированию. В проведенных расчетах авторами для оценки целесообразности пропуска длиннооставных поездов учитывались только показатели графика движения, при этом не учитывались дополнительные отказы технических средств, повышение износа инфраструктуры станций и участков.

Определить оптимальную величину осевой нагрузки возможно только при помощи исследований и оценки экономической эффективности. Такой подход позволяет взвешенно подходить не только к технической стороне

дела, к оценке возможностей инфраструктуры, но и к экономическим вопросам: просчитывать необходимые затраты и ожидаемые эффекты.

Дальнейшая апробация лучших отечественных и зарубежных практик будет способствовать развитию тяжеловесного движения в России. Главным фактором, безусловно, остается подготовка всей инфраструктуры железнодорожного транспорта к эксплуатации поездов повышенного веса и длины. Это подразумевает совершенствование элементов как верхнего, так и нижнего строения пути, а также технологий мониторинга, ремонта и технического обслуживания железнодорожного пути. Кроме того, необходимо уделить внимание совершенствованию формирования поездов повышенной длины в части ограничений по плану и профилю железнодорожных линий и полезной длины приемоотправочных путей на станциях. Рассмотренный опыт возможен к применению только после глубокой проработки и адаптации под условия эксплуатации железных дорог России.

#### Список литературы

1. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : сайт. URL: <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 29.08.2022).
2. Грузы готовы ехать. ОАО «РЖД» прогнозирует рекордные экспортные перевозки в 2022 году // Gudok.ru : сайт. URL: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1593862/> (Дата обращения 29.08.2022)
3. 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 29.08.2022).
4. Программа развития на сети железных дорог ОАО «РЖД» тяжеловесного движения. URL: <http://www.rzd-expro.ru/images/Events-2019/27ts/01.pdf> (Дата обращения 29.08.2022).
5. Кривошекова В.А., Левин А.В., Власова Н.В. Перспективы дальнейшего развития отрасли грузоперевозок железнодорожным транспортом в России // Цифровая экономика: перспективы развития и совершенствования : сб. науч. ст. III-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2022. С. 188–193.
6. Год в движении // Gudok.ru : сайт. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1582465> (Дата обращения 29.08.2022).
7. Успешно реализована отправка по колее 1520 длиннооставного контейнерного поезда из 123 вагонов, следующего из Китая в Европу // Teus.online : сайт. URL: <https://teus.online/news/972> (Дата обращения 30.08.2022).
8. Ковенькин Д.А. Влияние вертикальных неровностей путевой структуры на характер движения подвижного состава // Наука и образование транспорту. 2017. № 2. С. 100–102.

9. 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. 012042. DOI 10.1088/1757-899X/1064/1/012042.
10. Automation of failure forecasting on the subsystems of the railway transport complex in order to optimize the transportation process as a whole / M.V. Konstantinova, V.Yu. Konyukhov, E.A. Guseva et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2020. С. 012020. DOI:10.1088/1757-899X/1064/1/012020.
11. Formation of new principles and models of operation of structural units of the industry under the conditions of implementation of digital technologies / D.A. Lysenko, V.A. Olentsevich, N.V. Vlasova et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 1064. 012025. DOI 10.1088/1757-899X/1064/1/012025.
12. Малахова Т.А. Анализ причин задержек грузовых поездов на участках железной дорог // Наука, техника и образование. 2017. № 10 (40). С. 34–36.
13. Влияние отказов технических средств на задержку поездов / В.Д. Верескун, В.С. Воробьев, И.В. Яньшина и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2019. № 4 (76). С. 42–48.
14. Ресельс А.П., Филатов Е.В. Проблемы эксплуатации кривых участков пути при организации тяжеловесного движения на Восточном полигоне // Вестн. транспорта Поволжья. 2019. № 6. С. 42–48.
15. Влияние осевой нагрузки и состояния пути на интенсивность износа рельсов / В.О. Певзнер, Ю.С. Ромен, Е.А. Сидорова и др. // Вестн. Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2021. №2 (54). С. 64–69.
16. 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.
17. Секреты всего света // Gudok.ru : сайт. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1589827> (Дата обращения 30.08.2022)
18. Тяжелый вес магистральям на пользу // РЖД-Партнер : сайт. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/tiazhelyi-ves-magistraliam-na-polzu/> (Дата обращения 30.08.2022).
19. Поездам придали вес // Gudok.ru : сайт. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1391189> (Дата обращения 30.08.2022).
20. Расчет пропускной способности железных дорог / Е.В. Архангельский, Н.А. Воробьев, Н.А. Дроздов и др. М. : Транспорт, 1977. 310 с.
21. Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте / под ред. В. И. Ковалева, А. Т. Осьмина. Т. 1. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2009. 263 с.
22. Себестоимость железнодорожных перевозок / Н.Г. Смехова, А.И. Купоров, Ю.Н. Кожевников и др. М. : Маршрут, 2003. 494 с.

## References

1. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed August 29, 2022).
2. Gruzy gotovy ekhat'. OAO «RZhD» prognoziruet rekordnye eksportnye perevozki v 2022 godu (Elektronnyi resurs) [The loads are ready to go. JSC «Russian Railways» predicts record export shipments in 2022 (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1593862/> (Accessed August 29, 2022).
3. 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 August 29, 2022).
4. Programma razvitiya na seti zheleznykh dorog OAO «RZhD» tyazhelovesnogo dvizheniya (Elektronnyi resurs) [The program for the development of heavy traffic on the railway network of JSC «Russian Railways» (Electronic resource)]. Available at: <http://www.rzd-expo.ru/images/Events-2019/27ts/01.pdf> (Accessed August 29, 2022).
5. Krivoshchekova V.A., Levin A.V., Vlasova N.V. Perspektivy dal'neishego razvitiya otrasli gruzoperevozok zheleznodorozhnyim transportom v Rossii [Perspectives for further development of the freight transportation industry by rail in Russia]. *Sbornik nauchnykh statei III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tsifrovaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya»* [Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference «Digital Economy: Prospects for development and Improvement»]. Kursk, 2022, pp. 188–193.
6. God v dvizhenii (Elektronnyi resurs) [A Year in motion (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1582465> (Accessed August 29, 2022).
7. Uspeshno realizovana otpravka po kolee 1520 dlinnosostavnogo konteiner'nogo poezda iz 123 vagonov, sleduyushchego iz Kitaya v Evropu (Elektronnyi resurs) [The shipment of a 123-car long-composite container train from China to Europe along the 1520 gauge has been successfully implemented (Electronic resource)]. Available at: <https://teus.online/news/972> (Accessed August 30, 2022).
8. Koven'kin D.A. Vliyanie vertikal'nykh nerovnostei putevoi struktury na kharakter dvizheniya podvizhnogo sostava [The influence of vertical irregularities of the track structure on the nature of the movement of rolling stock]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and education for transport], 2017, no. 2, pp. 100–102.
9. Vlasova N.V., Olentsevich V.A., Konyukhov V.Yu, Lysenko D.A. Automated calculation method effect values in load securing elements fixed on a rolling stock. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 1064 (2021) 012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012042>.

10. Konstantinova M.V., Konyukhov V.Y., Guseva E.A., Olentsevich A.A., Olentsevich V.A. Automation of failure forecasting on the subsystems of the railway transport complex in order to optimize the transportation process as a whole. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Сер. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2020", 2021. P. 012020

11. Lysenko D.A., Konyukhov V.Y., Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Formation of new principles and models of operation of structural units of the industry under the conditions of implementation of digital technologies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 1064 (2021). 012025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012025>.

12. Malakhova T.A. Analiz prichin zaderzhek gruzovykh poezdov na uchastkakh zheleznoi dorogi [Analysis of the causes of delays of freight trains on railway sections]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, technology and education], 2017, no. 10 (40), pp. 34–36.

13. Vereskun V.D., Vorob'ev V.S., Yan'shina I.V., Repina I.B. Vliyanie otkazov tekhnicheskikh sredstv na zaderzhku poezdov [The impact of failures of technical means on train delays]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2019, no. 4 (76), pp. 42–48.

14. Resel's A.P., Filatov E.V. Problemy ekspluatatsii krivykh uchastkov puti pri organizatsii tyazhelovesnogo dvizheniya na Vostochnom poligone [Problems of operation of curved sections of the track in the organization of heavy traffic on the Eastern polygon]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga region], 2019, no. 6, pp. 42–48.

15. Pevzner V.O., Romen Yu.S., Sidorova E.A., Lisitsyn A.I., Baronaite R.A. Vliyanie osevoi nagruzki i sostoyaniya puti na intensivnost' iznosa rel'sov [Influence of axial load and track condition on the intensity of rail wear]. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog* [Bulletin of the Institute of Problems of Natural Monopolies: Railway Engineering], 2021, no. 2 (54), pp. 64–69.

16. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Neobkhodimost' razrabotki novykh proektnykh resheniy 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-prakticheskoy 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.

17. Sekrety vsego sveta (Elektronnyi resurs) [Secrets of the whole world (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1589827> (Accessed August 30, 2022).

18. Tyazhelyi ves magistralyam na pol'zu (Elektronnyi resurs) [Heavy weight is good for railways (Electronic resource)]. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/tiazhelyi-ves-magistralyam-na-pol'zu/> (Accessed August 30, 2022).

19. Poezdam pridali ves (Elektronnyi resurs) [Trains have been given weight (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1391189> (Accessed August 30, 2022).

20. Arkhangel'skii E.V., Vorob'ev N.A., Drozdov N.A., Miroshnichenko R.I., Segal L.G. Raschet propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog [Calculation of railway capacity]. Moscow: Transport Publ., 1977. 310 p.

21. Kovalev, V.I. Upravlenie ekspluatatsionnoi rabotoi na zheleznodorozhnom transporte (v 2 t.) [Management of operational work on railway transport (in 2 vol.)]. Moscow: UMTS ZDT Publ., 2009, 2011.

22. Smekhova N.G., Kuporov A.I., Kozhevnikov Yu.N., Potapovich N.A., Elizar'ev Yu.V., Sugrobova M.V., Shobanov A.V. Sebestoimost' zheleznodorozhnykh perevozok [Cost of rail transportation]. Moscow: Marshrut Publ., 2003. 494 p.

### Информация об авторах

**Оленцевич Виктория Александровна**, кандидат технических 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).

**Власова Наталья Васильевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [natalya.vlasova.76@list.ru](mailto:natalya.vlasova.76@list.ru).

**Каимов Евгений Витальевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [Eugen-Kaimov@yandex.ru](mailto:Eugen-Kaimov@yandex.ru).

### Information about the authors

**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).

**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).

**Evgeniy V. Kaimov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Building of railways, bridges and tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [Eugen-Kaimov@yandex.ru](mailto:Eugen-Kaimov@yandex.ru).

## Движение электровоза ЭП2К по неравноупругому железнодорожному пути без геометрических неровностей на поверхности катания рельсов

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

Целью представленного научного исследования является технико-экономическая оценка направлений по повышению В статье указывается на необходимость смены парадигмы дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, описывающими в настоящее время динамику подвижного состава железных дорог, на дифференциальные уравнения с переменными (случайными или периодическими) коэффициентами. Вертикальная жесткость железнодорожного пути в условиях дискретной инерционной модели не является постоянной величиной и может быть аппроксимирована рядом Фурье со 128 членами. Авторы нашли возможность ограничиться пятью членами. Рассмотрена задача взаимодействия неподдрессированной массы локомотива и неравноупругого по протяженности пути, который позволит определить все переменные значения, в том числе и ускорения. Главной причиной колебаний колесной пары, движущейся по идеальному (без геометрических неровностей) пути, является его неравноупругость. Показано, что если бы путь был равноупругим по протяженности, то подвижной состав на таком пути не совершал бы колебаний. Поэтому была выведена математическая модель динамического поведения кузова локомотива, тележки и колесной пары. Расчеты производились для локомотива ЭП2К. Исследовано влияние неравноупругости пути на ускорение подпрыгивания кузова электровоза, тележки и колесной пары. Установлено, что максимальное ускорение колесной пары локомотива при движении по неравноупругому пути с увеличением скорости возрастает от 0,36 до 0,6g, т. е. почти в два раза. Определены экспертные оценки критических скоростей для тележки, колесной пары и кузова локомотива, часть из которых находится в зоне эксплуатационных скоростей.

### Ключевые слова

железнодорожный путь, динамика подвижного состава, неравноупругость железнодорожного пути, обобщенные определители Хилла, нормальная форма Коши, локомотив ЭП2К, критические скорости экипажа

### Для цитирования

Нехаев В.А. Движение электровоза ЭП2К по неравноупругому железнодорожному пути без геометрических неровностей на поверхности катания рельсов / В.А. Нехаев, В.А. Николаев, Е.Г. Леоненко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 159–170. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).159-170.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 12.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 20.09.2022 г.; принята к публикации: 21.09.2022 г.

## Movement of the EP2K electric locomotive along an unevenly elastic railway track without geometric irregularities on the rail rolling surface

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

The article points out the need to change the paradigm of differential equations with constant coefficients, which currently describe the dynamics of the railway rolling stock, for differential equations with variable (random or periodic) coefficients. The vertical stiffness of a railway track under the conditions of a discrete inertial model is not a constant value and can be approximated by a Fourier series with 128 terms. We found it possible to limit ourselves to 5 members. The problem of interaction between the unsprung mass of a locomotive and a track that is unequally elastic along its length is considered, which will make it possible to determine all variable values, including accelerations. The main reason for vibrations of a wheel set moving along an ideal (without geometric irregularities) track is its non-uniform elasticity. It is shown that if the track were equally elastic in length, then the rolling stock on such a track would not oscillate. Therefore, a mathematical model of the dynamic behavior of the locomotive body, bogie and wheelset was derived. The calculations were made for the EP2K locomotive. The influence of non-uniform elasticity of the track on the bouncing acceleration of the locomotive body, bogie and wheelset is considered. It has been established that the maximum acceleration of the locomotive wheelset when moving along an unequally elastic track increases



from 0.36g to 0.6g with increasing speed, i.e. almost 2 times. Expert estimates of critical speeds for the bogie, wheelset and locomotive body are found, some of which are in the zone of operational speeds.

### Keywords

railway track, dynamics of rolling stock, unevenly elastic of railway track, generalized Hill determinants, Cauchy normal form, EP2K locomotive, critical crew speeds

### For citation

Nekhaev V.A., Nikolaev V.A., Leonenko E.G. Dvizhenie elektrovoza EP2K po neravnouprugomu zheleznodorozhnomu puti bez geometricheskikh nerovnostei na poverkhnosti kataniya rel'sov [Movement of the electric locomotive EP2K along an unevenly elastic railway track without geometric irregularities on the rail rolling surface]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 159–170. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).159-170.

### Article Info

Received: September 12, 2022; Revised: September 20, 2022; Accepted: September 21, 2022.

### Введение

Экспериментальные исследования вертикальной жесткости железнодорожных путей в Сибирском регионе указывают на непостоянство ее величины по протяженности рельсового звена, что приводит исследователей динамики подвижного состава к применению обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами (рис. 1).

Средняя величина жесткости пути вычислялась с помощью определенного интеграла и усреднялась по длине рельсового звена – 5 764,674 тс/м. Для вывода математической модели условного одноосного обобщенного электровоза ЭП2К использовалась дискретная инерционная модель пути. С применением энергетического метода Лагранжа второго рода получено:

$$A \ddot{z} + B \dot{z} + C(x)z = \vec{P}, \quad (1)$$

где  $A = \begin{pmatrix} M_k & 0 & 0 \\ 0 & M_T & 0 \\ 0 & 0 & M_{kn} \end{pmatrix}$  – матрица инерционных

коэффициентов электровоза;

$B = \begin{pmatrix} \beta_u & -\beta_u & 0 \\ -\beta_u & \beta_u + \beta_\sigma & -\beta_u \\ 0 & -\beta_\sigma & \beta_\sigma + \beta_n \end{pmatrix}$  – матрица диссипативных

коэффициентов электровоза;

$C(x) = \begin{pmatrix} c_u & -c_u & 0 \\ -c_u & c_u + c_\sigma & -c_\sigma \\ 0 & -c_\sigma & c_\sigma + c_n(x) \end{pmatrix}$  – матрица

жесткостных коэффициентов электровоза;

$\vec{P} = \begin{pmatrix} M_k \\ M_T \\ M_{kn} \end{pmatrix} g$  – вектор весовых нагрузок на электровоз.

Найденная система дифференциальных уравнений (1) по стандартному алгоритму [1] была приведена к нормальной форме Коши (этого требуют практически все численные методы интегрирования дифференциальных уравнений):

В дифференциальном уравнении (2) приняты следующие величины:  $\vec{Q} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vec{P} \end{pmatrix}$  – вектор

(размерности  $6 \times 1$ ) сил тяжести, действующих на электровоз;  $G(x) = \begin{pmatrix} O & E \\ -A^{-1}C(x) & -A^{-1}B \end{pmatrix}$  – матрица Коши;  $O$  – нулевая матрица размерности ( $3 \times 3$  в нашем случае);  $x = \frac{Vt}{3,6}$  – координата,

определяющая положение электровоза на железнодорожном пути, м;  $V$  – скорость движения электровоза, км/ч;  $t$  – время, с; 3,6 – переводной коэффициент скорости движения из км/ч в м/с;  $E$  – единичная матрица размерности  $3 \times 3$ ;

$\vec{Y} = \begin{pmatrix} \vec{z} \\ \dot{\vec{z}} \end{pmatrix}$  – новый вектор обобщенных координат размерности  $6 \times 1$ .

Так называемые параметрические колебания динамических систем, когда какие-либо из параметров зависят, например, от времени, исследовались многими авторами [2–6]. На железнодорожном транспорте большой вклад в изучение параметрических колебаний был внесен И.С. Леванковым и другими исследователями [7–20]. Известно, что системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами не обладают регулярными

методами их интегрирования. Поэтому часто ученым приходится прибегать либо к приближенным, либо численным методам.

Эти дифференциальные уравнения обладают рядом особенностей, главная из которых заключается в расширении такого важного понятия, как резонанс. В классическом понимании – это совпадение какой-либо собственной частоты с частотой вынуждающей силы. В случае параметрической системы под резонансом уже понимается не конкретное значение, а некоторая область значений, причем их количество является счетным множеством. Однако практическое значение имеют две-три зоны динамической неустойчивости (параметрического резонанса) [21]. В теории колебаний таких систем принято различать простые и комбинационные области параметрического резонанса, последние не возникают в консервативных динамических системах, а их ширина возрастает с увеличением диссипативных сил. В областях параметрического резонанса решения динамической системы экспоненциально растут или затухают, причем они разделяются периодическими решениями. Следовательно, последние являются границами областей параметрических резонансов. Отсюда очевидно, что не получится построить их численным интегрированием дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами.

### Расчет динамических составляющих, действующих на элементы механической части электровоза ЭП2К при движении по неравноупругому пути

В качестве исследуемого объекта возьмем электровоз ЭП2К. Для вычисления собственных частот электровоза в случае отсутствия диссипативных сил воспользуемся стан-

дартной функцией *Mathcad eigenvals*( $A^{-1}C_0$ ). При наличии сил вязкого трения применим матрицу Коши, т. е. *eigenvals*( $G(0)$ ). Результаты представлены в табл. 1.

Изучение результатов (см. табл. 1) позволяет утверждать, что частоты подпрыгивания кузова, тележки и колесной пары отличаются друг от друга в консервативном и диссипативном случаях несущественно. Наибольшая ошибка касается колесной пары электровоза и составляет 4,4 %. Рассмотрение логарифмического коэффициента затухания свободных колебаний  $\delta$  указывает на следующий факт – кузов электровоза демпфирован слабо, тележка электровоза лишь немного недодемпфирована (если считать нормой значение этого показателя в пределах 0,2–0,4), колесная пара демпфирована нормально. Малость диссипативных сил электровоза проверялась по критерию, предложенному в [1]:

$$\frac{\text{norme}[(A^{-1}B)^2]}{\text{norme}(A^{-1}C)} = 0,359. \quad (3)$$

Нормы матриц вычислялись по Эвклиду с помощью стандартной функции математического пакета *Mathcad norme* (...). Сравнение полученного с помощью (3) результата с последней колонкой в табл. 1 позволяет утверждать, что диссипативные силы электровоза ЭП2К являются малыми.

Так как вертикальная жесткость железнодорожного пути (см. рис 1) содержит скрытые периодичности, то вычислим критические скорости движения электровоза ЭП2К (табл. 2).

Из табл. 2 вытекает вывод, что в зону эксплуатационных скоростей движения поездов (40–120 км/ч) попадают одна – для кузова, две – для тележки и одна – для колесной пары. Эти скорости были вычислены исходя из условия,

Таблица 1. Значения частот в консервативном и диссипативном случаях

Table 1. Frequency values in conservative and dissipative cases

Элементы электровоза Locomotive elements	Консервативный случай Conservative case		Диссипативный случай $\delta = n / k_0$ Dissipative case	
	рад/с	Гц	рад/с	б/п
Кузов Body	9,907	1,577	9,910	0,053
Тележка Bogie	37,869	6,027	37,576	0,113
Колесная пара Wheelset	139,734	22,239	133,846	0,299

Таблица 2. Критические скорости движения электровоза по неравноупругому пути

Table 2. Critical speeds of an electric locomotive along an unevenly elastic path

Элементы электровоза Locomotive elements	Критические скорости движения электровоза, км/ч Critical locomotive speeds, km/h			
	Кузов Body	40,53	30,31	16,23
Тележка Bogie	154,92	115,86	62,05	23,61
Колесная пара Wheelset	–	–	–	87,11

что на спектральной плотности вертикальной жесткости пути обнаружены скрытые периодичности со следующими длинами волн (табл. 3).

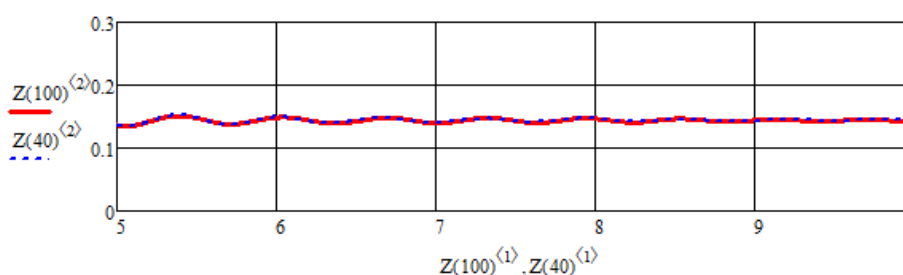
Необходимо отметить, что длина пятой составляющей хорошо коррелируется с

междушпальным расстоянием. В районе критических скоростей в виде клиньев будут развиваться области параметрических резонансов.

Результаты математического моделирования динамики электровоза ЭП2К показаны

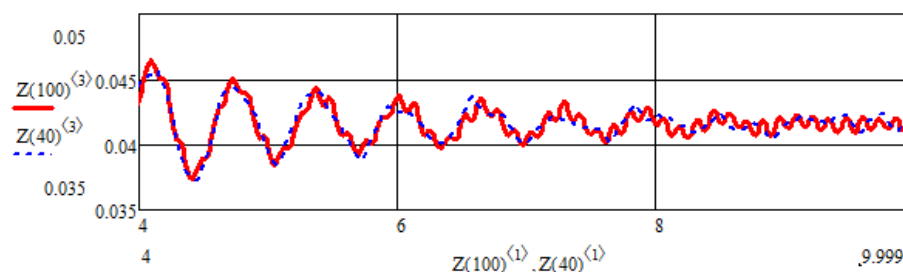
**Таблица 3.** Длины волн скрытых периодических составляющих  
**Table 3.** Wavelengths of hidden periodic components

№ составляющей # of the component	Длина волны, м Wavelength, m
1	15,620
2	3,570
3	2,670
4	1,430
5	0,544



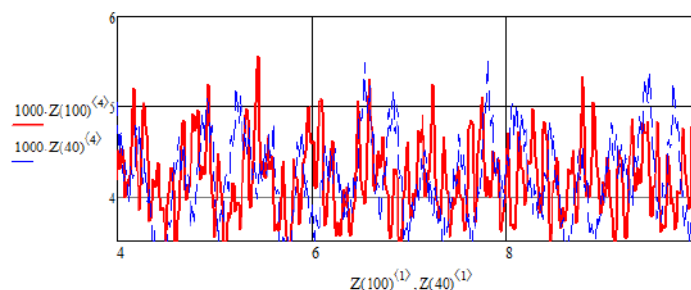
**Рис. 2.** Подпрыгивание кузова электровоза ЭП2К при движении по идеальному, но неравноупругому пути, м (красная кривая – скорость 100 км/ч; синяя кривая – скорость 40 км/ч)

**Fig. 2.** Bouncing of the EP2K electric locomotive body when moving along an ideal but unevenly path, m (red curve – speed 100 km/h; blue curve – speed 40 km/h)



**Рис. 3.** Подпрыгивание тележки электровоза ЭП2К при движении по идеальному, но неравноупругому пути, м (красная кривая – скорость 100 км/ч; синяя кривая – скорость 40 км/ч)

**Fig. 3.** Bouncing of the bogie of the electric locomotive EP2K when moving along an ideal, but unevenly elastic track, m (red curve – speed 100 km/h; blue curve – speed 40 km/h)



**Рис. 4.** Подпрыгивание колесной пары электровоза ЭП2К при движении по идеальному, но неравноупругому пути, м (красная кривая – скорость 100 км/ч; синяя кривая – скорость 40 км/ч)

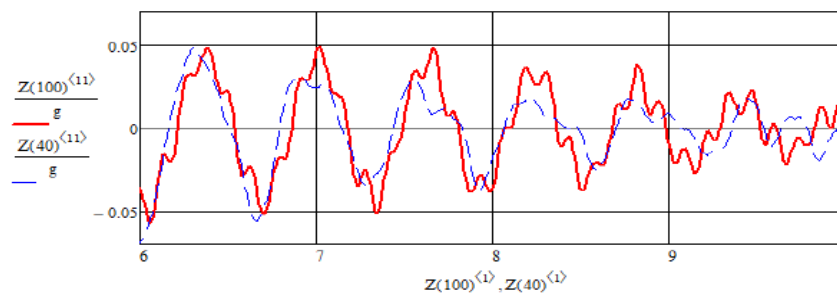
**Fig. 4.** Bouncing of the wheelset of the electric locomotive EP2K when moving along an ideal, but unevenly elastic track, m

ниже на рис. 2–10. Рис. 2–4 указывают на то, что чем дальше узел электровоза от железнодорожного пути, тем в меньшей степени он отзывается на неравноупругость пути.

Ускорения подпрыгивания соответствующих узлов электровоза ЭП2К отличаются друг от друга несколько больше, чем перемещения. Можно приближенно полагать, что подпрыгивание кузова электровоза от скорости его движения практически не зависит. Подпры-

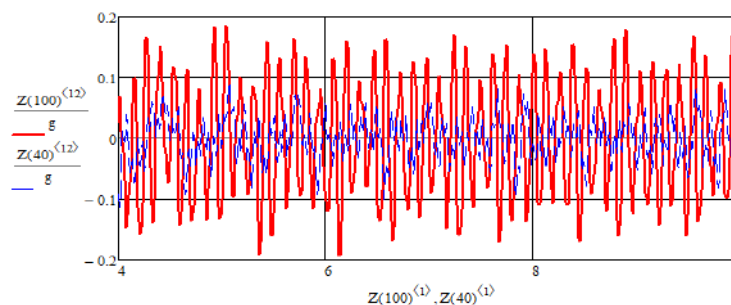
гивание тележки имеет немного большую амплитуду колебания.

Графики, показанные на рис. 2–4, указывают на то, что перемещения частей электровоза ЭП2К нельзя считать гармоническими, поэтому необходим спектральный анализ. Для экспертной оценки воспользуемся размахом амплитуд кузова, тележки и колесной пары. По рис. 5 понятно, что ускорения подпрыгивания кузова электровоза при скорости 40 и 100 км/ч



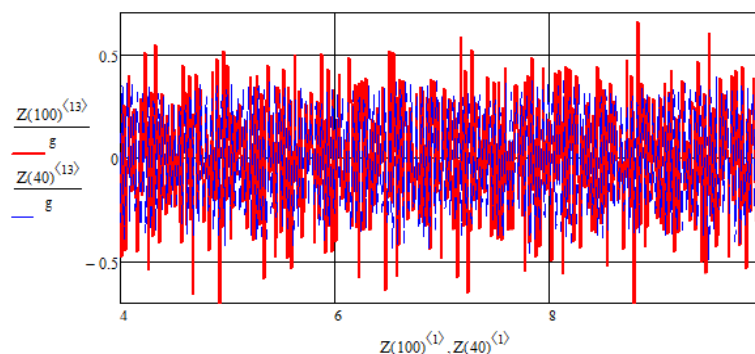
**Рис. 5.** Ускорение подпрыгивания кузова электровоза ЭП2К при движении по идеальному, но неравноупругому пути, в долях  $g$  (красная кривая – скорость 100 км/ч; синяя кривая – скорость 40 км/ч)

**Fig. 5.** Acceleration of bouncing of the EP2K electric locomotive body when moving along an ideal, but unevenly elastic track, in fractions of  $g$  (red curve – speed 100 km/h; blue curve – speed 40 km/h)



**Рис. 6.** Ускорение подпрыгивания тележки электровоза ЭП2К при движении по идеальному, но неравноупругому пути, в долях  $g$  (красная кривая – скорость 100 км/ч; синяя кривая – скорость 40 км/ч)

**Fig. 6.** Acceleration of bouncing of the EP2K electric locomotive bogie when moving along an ideal, but unevenly elastic path, in fractions of  $g$  (red curve – speed 100 km/h; blue curve – speed 40 km/h)



**Рис. 7.** Ускорение подпрыгивания колесной пары электровоза ЭП2К при движении по идеальному, но неравноупругому пути, в долях  $g$  (красная кривая – скорость 100 км/ч; синяя кривая – скорость 40 км/ч)

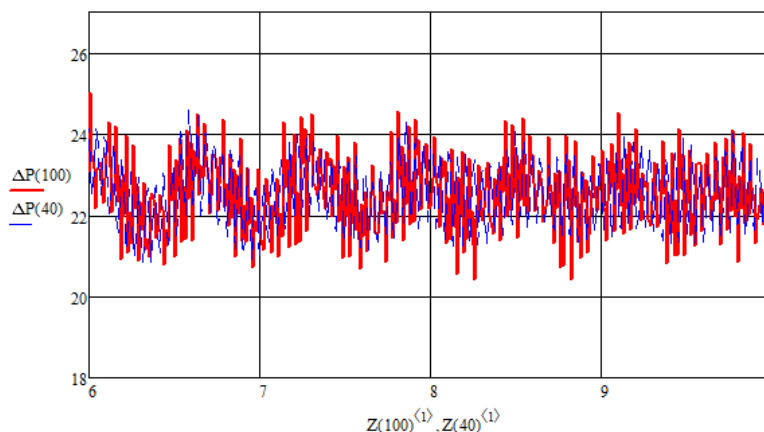
**Fig. 7.** Acceleration of bouncing of the wheelset of the electric locomotive EP2K when moving along an ideal, but unevenly elastic track, in fractions of  $g$  (red curve – speed 100 km/h; blue curve – speed 40 km/h)

совпадают. Объяснить это можно только высокими фильтрующими свойствами подвешивания электровоза.

Максимальные значения ускорения колесной пары электровоза находятся в пределах 0,4–0,6g (при  $V = 40\text{--}100$  км/ч), т. е. ускорение колесной пары электровоза не очень большое при движении по неравноупругому пути. С возрастанием неравноупругости оно будет увеличиваться.

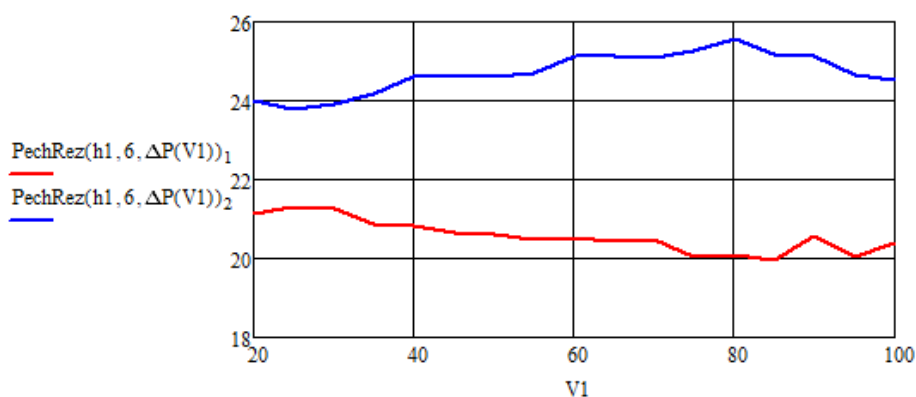
Вид полученных реализаций для давления на неравноупругий путь требует спектрального анализа, чтобы сделать вывод о том, какая составляющая неравноупругого пути является наиболее опасной с точки зрения безопасности движения поездов.

Среднее давление электровоза на железнодорожный путь показано в табл. 4. Вычисления среднего давления выполнялись по формуле:



**Рис. 8.** Давление электровоза ЭП2К на путь при движении по идеальному, но неравноупругому пути (тс) (красная кривая – скорость 100 км/ч; синяя кривая – скорость 40 км/ч)

**Fig. 8.** Pressure of the electric locomotive EP2K on the track when moving along an ideal, but unevenly elastic track (ts) (red curve – speed 100 km/h; blue curve – speed 40 km/h)



**Рис. 9.** Размах давления электровоза ЭП2К на путь при движении по идеальному, но неравноупругому пути (тс)

(красная кривая – скорость 100 км/ч; синяя кривая – скорость 40 км/ч)

**Fig. 9.** The pressure range of the electric locomotive EP2K on the track when moving along an ideal, but unevenly elastic track (ts) (red curve – speed 100 km/h; blue curve – speed 40 km/h)

**Таблица 4.** Экспертная оценка среднего давления электровоза на путь

**Table 4.** Expert assessment of the average pressure of an electric locomotive on the track

$V$ , км/ч	20	40	60	80	100
$\langle \Delta P \rangle$ , тс	22,560	22,517	21,617	22,055	22,592

$$\langle \Delta P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P(t) dt, \quad (4)$$

здесь  $T$  – длина реализации давления электровоза на путь во времени.

Статическое давление электровоза на путь составляет 22,610 тс. Его сравнение с данными табл. 4 позволяет сделать вывод о том, что экспертная оценка среднего давления электровоза ЭП2К на неравноупругий путь на перегоне чрезвычайно близка к статическому давлению. Максимальное значение размаха давления на путь достигает приблизительно 6 тс на скорости 80 км/ч. Эта скорость весьма близка к критической скорости движения электровоза, а именно колесной пары. Около этой скорости возникает параметрический резонанс колесной пары, но ее амплитуда, несомненно, ограничена силами трения электровоза. Однако они создают критическое значение для коэффициента параметрического возбуждения  $\mu$ .

Динамическая система (2) является линейной, следовательно, для нее справедлив принцип суперпозиции. Поэтому для каждой гармоники демумльтипликационного воздействия границы областей динамической неустойчивости, видимо, можно отыскивать отдельно. Поэтому выделим неравноупругость пути в виде отдельного слагаемого в дифференциальных уравнениях, переписав (2) так:

$$\dot{\vec{Y}} = G_0 \vec{Y} + 2\mu G_1 \vec{Y} \cos 2\Omega t, \quad (5)$$

где  $G = \begin{pmatrix} 0 & E \\ -A^{-1}C & -A^{-1}B \end{pmatrix}$  – матрица Коши, теперь все ее элементы являются постоянными

величинами;  $C = \begin{pmatrix} c_u & -c_u & 0 \\ -c_u & c_u + c_\sigma & -c_\sigma \\ 0 & -c_\sigma & c_\sigma + c_0 \end{pmatrix}$  – матрица жесткостных коэффициентов электровоза на равноупругом пути, когда жесткость пути

равна  $c_{п}(x) = c_0$ ;  $\Lambda = c_0 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  – матрица неравноупругости железнодорожного пути;

$G_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ A^{-1}\Lambda & 0 \end{pmatrix} G_1$  – матрица Хилла для неравноупругости пути;  $\mu$  – коэффициент параметрического возмущения, б/р (его величина находится в пределах 0–0,07);  $\Omega = \frac{\pi V}{3,6l_k}$  – частота

параметрического возбуждения, зависящая как от скорости движения электровоза (км/ч), так и от длины составляющей неравноупругости  $l$

(см. табл. 3);  $\vec{Y} = \begin{pmatrix} y_k \\ y_T \\ y_{кп} \\ \vdots \\ y_k \\ \vdots \\ y_T \\ \vdots \\ y_{кп} \end{pmatrix}$  – вектор обобщенных

координат ( $y_k, y_T, y_{кп}$  – подпрыгивание соответственно кузова, тележки, колесной пары).

Заметим, что в (5) был опущен постоянный член  $\vec{Q}$ , так как он не оказывает никакого влияния на границы областей параметрических резонансов (или динамической неустойчивости) [22].

Обратимся к поиску зон параметрической неустойчивости кузова, тележки и колесной пары электровоза, приняв  $l = l_k$ . Тогда частота мультипликативного возмущения вычисляется по (6):

$$\Omega = \frac{\pi V}{3,6l_k}. \quad (6)$$

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами будем разыскивать в виде:

$$\vec{Y} = \vec{A}_1 \cos \Omega t + \vec{B}_1 \sin \Omega t + \vec{A}_3 \cos 3\Omega t + \vec{B}_3 \sin 3\Omega t, \quad (7)$$

Это позволит нам определить границы параметрического резонанса для главной (первой) и третьей области динамической неустойчивости:

$$\det(K(\mu) - \Omega E) = 0, \quad (8)$$

здесь матрица  $K(\mu)$  для первой и третьей зон неустойчивости равна:

$$K(\mu) = \begin{pmatrix} 0 & -(G - G) & 0 & -\mu G_1 \\ G_0 + \mu G_1 & 0 & \mu G_1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}\mu G_1 & 0 & -\frac{1}{3}G_0 \\ \frac{1}{3}\mu G_1 & 0 & G & 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Для нахождения второй и четвертой областей параметрического резонанса общее решение (5) разыскиваем в виде:

$$\vec{Y} = \vec{A}_0 \vec{A}_2 \cos 2\Omega t + \vec{B}_2 \sin 2\Omega t + \vec{A}_4 \cos 4\Omega t + \vec{B}_4 \sin 4\Omega t. \quad (10)$$

Подстановка (10) после дифференцирования по времени в левую часть (5) и просто так в правую часть с дальнейшими тригонометриче-

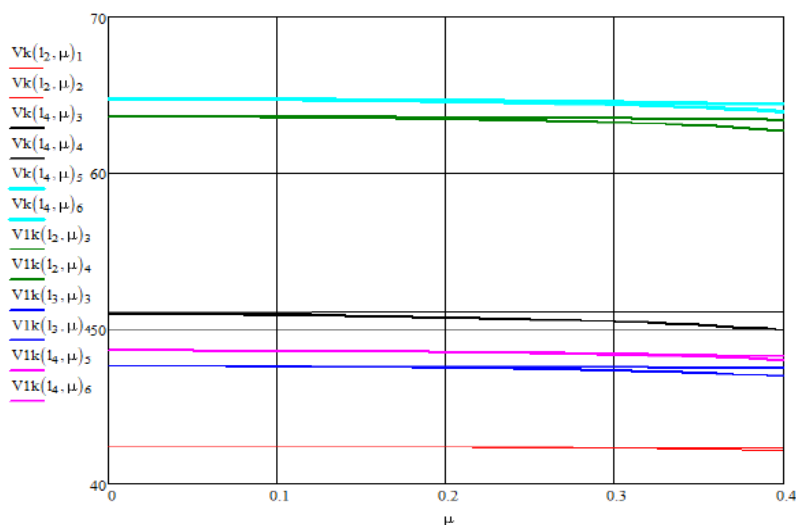
скими преобразованиями приводит к следующей матрице  $K(\mu)$ :

$$K(\mu) = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{2}G & 0 & -\frac{1}{2}G_1 \\ \frac{1}{2}(G_0 - 2\mu^2 G_1 G_0^{-1} G_1) & 0 & \frac{1}{2}\mu G_1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}\mu G_1 & 0 & -\frac{1}{4}G_0 \\ \frac{1}{4}\mu G_1 & 0 & \frac{1}{4}G_0 & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

где под 0, как и в (9), подразумевается нулевая матрица размерности любой из матриц  $G_0$  или

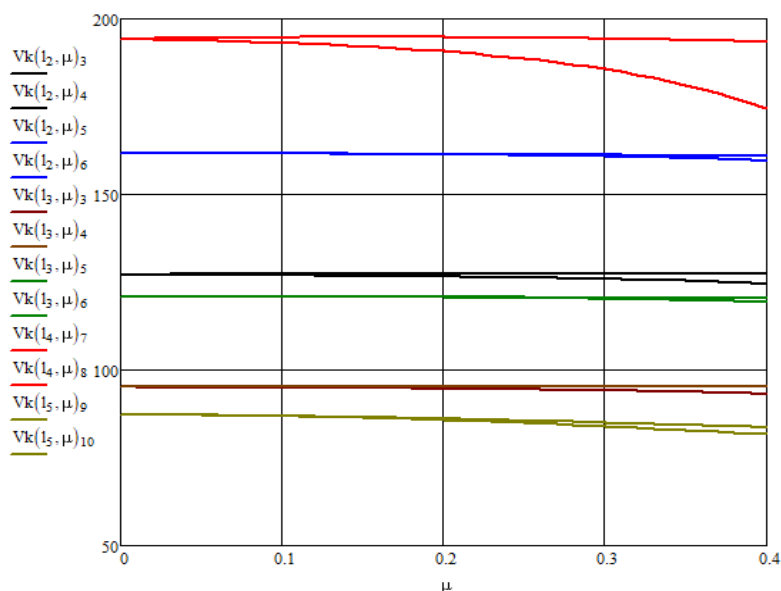
$G_1$ , т. е.  $6 \times 6$ . Отметим, что чем больше членов мы учитываем в решениях (7) и (10), тем выше и шире становятся матрицы (9) и (11).

Критические скорости кузова, тележки и колесной пары электровоза ЭП2К, в районе которых развиваются параметрические резонансы, показаны в табл. 5. Результаты математического моделирования уравнения (8) представлены на рис. 10 и 11.



**Рис. 10.** Резонансные скорости движения электровоза ЭП2К по неравноупругому пути в диапазоне скоростей 40–70 км/ч

**Fig. 10.** Resonance speeds of the electric locomotive EP2K along an unevenly elastic track in the Siberian in the speed range of 40–70 km/h



**Рис. 11.** Резонансные скорости движения электровоза ЭП2К по неравноупругому пути в диапазоне скоростей 70 – 200 км/ч

**Fig. 11.** Resonance speeds of the electric locomotive EP2K along an unevenly elastic track in the speed range of 70–200 km/h

**Таблица 5.** Критические скорости движения электровоза ЭП2К по неравноупругому пути, км/ч  
**Table 5.** Critical speed values of the EP2K electric locomotive on an unequal track, km/h

Составляющие неравноупругости Uneven elasticity components	Кузов Body	Тележка Bogie	Колесная пара Wheelset
1	177,332	677,829	2 501,119
2	40,53	154,92	571,639
3	30,312	115,864	427,528
4	16,235	62,055	228,976
5	6,176	23,607	87,107

Сразу оговоримся, что нами опущены скорости от 2 до 40 км/ч, а также свыше 200 км/ч. Оставлены только те скорости, которые попадают в зону эксплуатационных скоростей.

Если допустить, что железнодорожный путь является равноупругим, т. е. вертикальная жесткость пути на его протяженности постоянна, то мы получили бы только три резонансных частоты, совпадающие с собственными, а именно – 9,907; 37,869; 139,734 рад/с. Дальше все определяется длиной волны геометрической неровности или ее спектральной плотностью. На спектральной плотности подпрыгиваний кузова, тележки и колесной пары электровоза обнаружился бы на указанных частотах «пики».

Если мы меняем парадигму дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами на парадигму дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, что более точно отражает физическую сущность, то получим достаточно широкий диапазон скоростей шести областей динамической неустойчивости на рис. 10 и ровно столько же на рис. 11. Итого имеем 12 зон параметрического резонанса.

Исследовался условный, обобщенный, одноосный электровоз ЭП2К. За пределами анализа остались галопирование кузова и тележек. Если полагать, что для первой и второй тележек эти движения идентичны, то к уже найденным критическим скоростям еще добавится десять новых значений.

### Заключение

Речь идет о простых параметрических резонансах, однако известно о существовании ком-

бинационных параметрических резонансах разностного или суммарного типов, возникающих в механических системах с числом степеней свободы больше двух. В некотором смысле они напоминают «внутренние» резонансы, вообще говоря, силы трения в системе больше, тем они шире. Таким образом, в консервативных системах комбинационные резонансы не могут возникать. Методика их оценки пока для железнодорожного транспорта не разработана.

Установлена необходимость нормирования неравноупругости железнодорожного пути подобно тому, как это делается для геометрических неровностей на поверхности катания рельсов (как известно, нормируется градиент неровности, его нетрудно измерить физически). Для неравноупругости железнодорожного пути поступить так нельзя, необходима разработка методики ее нормирования.

Укажем на наличие соответствующих работ для железнодорожного транспорта [7–21, 23–25]. Но общая методика анализа параметрических колебаний на железнодорожном транспорте до настоящего времени не создана, так как высшая математика не предлагает нам регулярного рецепта интегрирования таких сложных уравнений. Все что на сегодняшний день мы имеем, это частные методики и применение приближенных или численных методов решения, которые до настоящего времени не могут определить все известные свойства уравнения Хилла в неоднородном случае.

Последняя известная авторам публикация на рассматриваемую тему представлена в 2017 г [25].

### Список литературы

1. Вибрации в технике: справочник (в 6 т.). Т. 1. Колебания линейных систем. М. : Машиностроение, 1978. 352 с.
2. Якубович В.А., Старжинский В.М. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения. М. : Наука, 1972. 720 с.
3. Якубович В.А., Старжинский В.М. Параметрический резонанс в линейных системах. М. : Наука, 1987. 328 с.
4. Шмидт Г. Параметрические колебания. М. : Мир, 1978. 336 с.



5. Мак-Лахлан Н.В. Теория и приложения функций Матье. М. : Иностранная литература, 1953. 63 с.
6. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью // Математический сборник. 1960. Т. 51. № 1. С. 99–128.
7. Бондаренко Г.В. Уравнение Хилла и его применение в области технических колебаний. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1936. 58 с.
8. Леванков И.С. Качественный анализ свободных колебаний системы «неподдрессоренная масса – путь» при периодическом изменении жёсткости пути по его длине // Науч. тр. ДИИТа. 1972. № 138. С. 57–73.
9. Леванков И.С. Влияние неравножёсткости пути на шпалах и междушпальных пролётах на силы взаимодействия пути и подвижного состава // Науч. тр. ДИИТа. 1965. № 57. С. 63–79.
10. Леванков И.С. Исследование влияния изменения жесткости вдоль звена пути на характер и силы взаимодействия пути и подвижного состава // Науч. тр. ДИИТа, 1969. № 99. С. 76–93.
11. Фришман М.А., Леванков И.С. Исследование особенностей изменения вертикальной жесткости пути по его длине. Науч. тр. ДИИТа, 1972. № 138. С. 48–57.
12. Фришман М.А., Липовский Р.С., Данович В.Д. Экспериментальное определение частотных характеристик рельсошпальной решётки // Науч. тр. ДИИТа, 1978. № 198/20. С. 3–11.
13. Фришман М.А., Леванков И.С. Об особенностях изменения вертикальной жёсткости вдоль пути с тяжёлым типом верхнего строения // Науч. тр. ДИИТа. 1973. № 142. С. 3–10.
14. Некоторые результаты экспериментального определения жесткости пути / Л.Я. Воробейчик, В.П. Гнеденко, В.И. Климов и др. // Науч. тр. ДИИТа. 1974. № 148. С. 9–16.
15. Карминский Д.Э., Кашников В.Н., Филоненков А.И. Исследование влияния периодической неравноупругости рельсовой нити в плане на характеристики динамического входа экипажей в кривые // Материалы (Тезисы докладов) Науч.-техн. конф. секций ДорНТО СКЖД и кафедр Ин-та. Ростов-на-Дону, 1971. С. 229–233.
16. Пахомов М.П., Нехаев В.А. Взаимодействие параметрически возбуждаемых и вынужденных колебаний колесной пары локомотива или вагона // Тезисы научно-технической конференции кафедр Омского института инженеров железнодорожного транспорта. Омск, 1984. С. 97–98.
17. Нехаев В.А., Астрелин В.А. О замене неравноупругости пути геометрической неровностью в задачах о колебаниях локомотивов // Тезисы научно-технической конференции кафедр ОмИИТа. Омск, 1986. С. 110.
18. Пахомов М.П., Нехаев В.А. К вопросу о параметрических колебаниях подвижного состава // Вопросы улучшения тяговых, энергетических и эксплуатационных свойств электровозов : сб. ст. Свердловск, 1978. № 59. С. 91–96.
19. Нехаев В.А., Сабиров Р.Д. Неравноупругость железнодорожного пути как возмущающий фактор // Известия Транссиба. 2013. № 3(15). С. 42–54.
20. Пахомов М.П., Галиев И.И., Нехаев В.А. Математическая модель колебаний тележки локомотива при движении по неравноупругому вдоль рельсового звена пути // Взаимодействие подвижного состава и пути и динамика локомотивов дорог Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера : межвуз. тем. сб. науч. тр. Омск, 1981. С. 9–15.
21. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. М. : ГИТТЛ, 1956. 600 с.
22. Бурчак Г.П. Колебания неподдрессоренной массы на неравноупругом пути с неровностью // Науч. тр. Акад. коммун. хоз-ва им. К.Д. Панфилова. 1980. Вып. 175. С. 84–98.
23. Панькин Н.А., Стесин И.М., Ценов В.П. Колебательные движения экипажей при параметрическом возмущении // Вестник ВНИИЖТ. 1978. № 1. С. 27–30.
24. Панькин Н.А., Стесин И.М., Бельняк Ю.Г. Вертикальные колебания экипажа, возникающие при движении по неравноупругому пути // Науч. тр. МИИТа. 1979. № 640. С. 24–32.
25. Буданов В.М. Об одной форме решения уравнения Матье // Вестник Моск. ун-та. Сер. 1. Математика, механика. 2017. № 1. С. 42–47.

### References

1. Vibratsii v tehnikе (spravochnik v 6 tomakh). Tom 1. Kolebaniya lineinykh sistem [Vibrations in Engineering (A handbook in 6 vol.). Vol. 1. Oscillations of linear systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 352 p.
2. Yakubovich V.A., Starzhinskii V.M. Lineinie differentsial'nye uravneniya s periodicheskimi koeffitsientami i ikh prilozheniya [Linear differential equations with periodic coefficients and their applications]. Moscow: Nauka Publ., 1972. 720 p.
3. Yakubovich V.A., Starzhinskii V.M. Parametricheskii rezonans v lineinykh sistemakh [Parametric resonance in linear systems]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 328 p.
4. Schmidt G. Parametricheskie kolebaniya [Parametric oscillations]. Moscow: Mir Publ., 1978. 336 p.
5. McLachlan N.V. Teoriya i prilozheniya funktsii Mate [Theory and applications of Mathieu functions]. Moscow: Inostrannaya literature Publ., 1953. 63 p.
6. Filippov A.F. Differentsial'nye uravneniya s razryvnoi pravoй chast'yu [Differential equations with a discontinuous right-hand side]. *Matematicheskii sbornik* [Sbornik: Mathematics], 1960, vol. 51, no. 1, pp. 99–128.
7. Bondarenko G.V. Uravnenie Hilla i ego primenenie v oblasti tekhnicheskikh kolebanij [Hill's equation and its application in the field of technical fluctuations]. Moscow–Leningrad: AN SSSR Publ., 1936. 58 p.
8. Levankov I.S. Kachestvennyi analiz svobodnykh kolebanii sistemy «nepodressorennyaya massa – put'» pri periodicheskom izmenenii zhestkosti puti po ego dline [Qualitative analysis of free oscillations of the «unsprung mass – path» system with periodic changes in the stiffness of the path along its length]. *Nauchnye trudy Dnepropetrovskogo instituta inzhenerov transporta* [Scientific proceedings of Dnepropetrovsk institute of engineers of transport], 1972, no. 138, pp. 57–73.

9. Levankov I.S. Vliyanie neravnozhestkosti puti na shpalakh i mezhdushpal'nykh proletakh na sily vzaimodeistviya puti i po-dvizhnogo sostava [The influence of the non-rigidity of the track on sleepers and interspan spans on the interaction forces of the track and rolling stock]. *Nauchnye trudy Dnepropetrovskogo instituta inzhenerov transporta* [Scientific proceedings of Dnepropetrovsk institute of engineers of transport], 1965, no. 57, pp. 63–79.

10. Levankov I.S. Issledovanie vliyaniya izmeneniya zhestkosti vdol' zvena puti na kharakter i sily vzaimodeistviya puti s podvizhnym sostavom [Investigation of the influence of stiffness change along the track link on the nature and forces of interaction between the track and the rolling stock]. *Nauchnye trudy Dnepropetrovskogo instituta inzhenerov transporta* [Scientific proceedings of Dnepropetrovsk institute of engineers of transport], 1969, no. 99, pp. 76–93.

11. Frishman M.A., Levankov I.S. Issledovanie osobennosti izmeneniya vertikal'noi zhestkosti puti po ego dline [Research of the features of the change in the vertical stiffness of the path along its length]. *Nauchnye trudy Dnepropetrovskogo instituta inzhenerov transporta* [Scientific proceedings of Dnepropetrovsk institute of engineers of transport], 1972, no. 138, pp. 48–57.

12. Frishman M.A., Lipovskii R.S., Danovich V.D. Eksperimental'noe opredelenie chastotnykh kharakteristik rel'soshpal'noi reshetki [Experimental determination of the frequency characteristics of the rail-sleeper grating]. *Nauchnye trudy Dnepropetrovskogo instituta inzhenerov transporta* [Scientific proceedings of Dnepropetrovsk institute of engineers of transport], 1978, no. 198/20, pp. 3–11.

13. Frishman M.A., Levankov I.S. Ob osobennostyakh izmeneniya vertikal'noi zhestkosti vdol' puti s tyazhelym tipom verkhnego stroeniya [About the peculiarities of the change in vertical stiffness along the path with a heavy type of upper structure]. *Nauchnye trudy Dnepropetrovskogo instituta inzhenerov transporta* [Scientific proceedings of Dnepropetrovsk institute of engineers of transport], 1973, no. 142, pp. 3–10.

14. Vorobeichik L.Ya., Gnedenko V.P., Klimov V.I., Levankov I.S. Nekotorye rezul'taty eksperimental'nogo opredeleniya zhestkosti puti [Some results of the experimental determination of the rigidity of the path]. *Nauchnye trudy Dnepropetrovskogo instituta inzhenerov transporta* [Scientific proceedings of Dnepropetrovsk institute of engineers of transport], 1974, no. 148, pp. 9–16.

15. Karminskii D.E., Kashnikov V.N., Filonenkov A.I. Issledovanie vliyaniya periodicheskoi neravnouprugosti rel'sovoi niti v plane na kharakteristiki dinamicheskogo vkhoda ekipazhei v krivye [Investigation of the influence of the periodic uneven elasticity of a rail thread in the plane on the characteristics of the dynamic entry of vehicles into curves]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii sektsii Dor NTO SKZHD i kafedr instituta* [Proceedings of scientific-technical conference of section: Dor. NTO of the North Caucasus Railway and departments of the institute]. Rostov-on-Don, 1971, pp. 229–233.

16. Pakhomov M.P., Nekhaev V.A. Vzaimodeistvie parametricheski vzbuzhdaemykh i vyzhuzhennykh kolebaniy kolesnoi pary lokomotiva ili vagona [Interaction of parametrically excited and forced vibrations of a wheel pair of a locomotive or wagon]. *Tezisy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii kafedr Omskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta* [Abstracts of the scientific and technical conference of the departments of the Omsk Institute of Railway Engineers]. Omsk, 1984, pp. 97–98.

17. Nekhaev V.A., Astrelin V.A. O zamene neravnouprugosti puti geometricheskoi nerovnostyu v zadachakh o kolebaniyakh lokomotivov [On the replacement of unequal elasticity of the track by geometric roughness in problems of locomotive oscillations]. *Tezisy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii kafedr Omskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta* [Abstracts of the scientific and technical conference of the departments of the Omsk Institute of Railway Engineers]. Omsk, 1986. 110 p.

18. Pakhomov M.P., Nekhaev V.A. K voprosu o parametricheskikh kolebaniyakh podvizhnogo sostava [On the issue of parametric oscillations of the rolling stock]. *Sbornik statei «Voprosy uluchsheniya tyagovykh, energeticheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv elektrovozov»* [Proceedings «Issues of improving the traction, energy and operational properties of electric locomotives»]. Sverdlovsk, 1978, no. 59, pp. 91–96.

19. Nekhaev V.A., Sabirov R.D. Neravnouprugost' zheleznodorozhnogo puti kak vozmushchayushchii faktor [Unequal elasticity of the railway track as a disturbing factor]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2013, no. 3(15), pp. 42–54.

20. Pakhomov M.P., Galiev I.I., Nekhaev V.A. Matematicheskaya model kolebaniy telezhki lokomotiva pri dvizhenii po neravnouprugomu vdol' rel'sovogo zvena puti [Mathematical model of oscillations of a locomotive bogie when moving along an unequally elastic track along a rail link]. *Mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov «Vzaimodeistvie podvizhnogo sostava i puti i dinamika lokomotivov dorog Sibiri, Dalnego Vostoka i Krainego Severa»* [Interuniversity topics proceedings «Interaction of rolling stock and tracks and dynamics of locomotives on the roads of Siberia, the Far East and the Far North»]. Omsk, 1981, pp. 9–15.

21. Bolotin V.V. Dinamicheskaya ustoychivost' uprugikh sistem [Dynamic stability of elastic systems]. Moscow: GITTL Publ., 1956. 600 p.

22. Burchak G.P. Kolebaniya nepodressorennoi massy na neravnouprugom puti s nerovnostyu [Oscillations of the unsprung mass on an unequal elastic track with unevenness]. *Nauchnye trudy Akademii kommunisticheskogo khozyaistva im. K.D. Panfilova* [Scientific proceedings of Academy of communistic facilities named after K.D. Panfilov], 1980, no. 175, pp. 84–98.

23. Pan'kin N.A., Stesin I.M., Tsenov V.P. Kolebatel'nye dvizheniya ekipazhei pri parametricheskom vozmushchenii [Oscillatory motions of vehicles under parametric perturbation]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of All-Union scientific-research institute of railway transport], 1978, no. 1, pp. 27–30.

24. Pan'kin N.A., Stesin I.M., Belenkaya Yu.G. Vertikal'nye kolebaniya ekipazha, voznikayushchie pri dvizhenii po neravnouprugomu puti [Vertical oscillations of the crew, arising when moving along an unequal-elastic path]. *Nauchnye trudy Moskovskogo instituta inzhenerov transporta* [Scientific proceedings of Moscow institute of engineers of transport], 1979, no. 640, pp. 24–32.

25. Budanov, V.M. Ob odnoi forme resheniya uravneniya Mate [On one form of solution of the Mathieu equation]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 1, matematika, mekhanika* [Bulletin of Moscow University. Ser. 1, Mathematics, mechanics], 2017, no. 1, pp. 42–47.

**Информация об авторах**

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

**Николаев Виктор Александрович**, доктор технических 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 «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 Electromechanical Department, Krasnoyarsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk; e-mail: leonenko-eg@mail.ru.

## Имитационное моделирование и оценка перерабатывающей способности элементов транспортного узла Пусан

Тэк Енг Ли, Р.Г. Король ✉

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

✉kingkhv27@mail.ru

### Резюме

Организация Транскорейской железной дороги с выходом на континентальную железнодорожную сеть позволит сформировать новые транспортно-логистические цепи, в которых внешнеторговый контейнеропоток будет сосредоточен в транспортном узле Пусан (Республика Корея). Основные международные контейнерные линии проходят через порт Пусан, где осуществляется перегрузка контейнеров из портов Юго-Восточной Азии и Китая на морские суда для доставки в дальневосточные порты России, он служит основным звеном транспортно-логистических цепей параллельного импорта. Сегодня терминально-логистическая инфраструктура порта Пусан не справляется с обработкой увеличивающихся объемов контейнеропотока, простаивает морской и наземный транспорт в ожидании технологических операций, что приводит к логистическим рискам. Целью настоящей статьи является определение резервов перерабатывающей способности транспортного узла Пусан с учетом переориентации части контейнеропотока на железнодорожный транспорт. Для достижения поставленной цели была разработана программа оценки перерабатывающей способности элементов транспортного узла при изменении объемов контейнеропотока. Задачи данного исследования заключаются в анализе объемов переработки контейнеров в порту Пусан, разработке технологической схемы взаимодействия инфраструктурных объектов и имитационном моделировании работы подсистем транспортного узла Пусан. Предмет исследования – транспортная и терминально-логистическая инфраструктура транспортного узла Пусан. В работе использованы теоретические и математические методы исследования, в том числе моделирование, визуализация и сравнение. В статье представлены результаты двух сценариев моделирования: при существующих объемах работы и при инфраструктурном переоснащении для обработки перспективного контейнеропотока. Предложено поэтапное развитие перерабатывающей способности транспортного узла Пусан, включающее модернизацию инфраструктуры, организационно-технологические и технические мероприятия.

### Ключевые слова

имитационное моделирование, терминально-логистическая инфраструктура, транспортный узел, порт Пусан

### Для цитирования

Ли Т.Е. Имитационное моделирование и оценка перерабатывающей способности элементов транспортного узла Пусан / Т.Е. Ли, Р.Г. Король // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 171–180. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).171-180.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 6.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 19.09.2022 г.; принята к публикации: 20.09.2022 г.

## Simulation modeling and evaluation of processing capacity of Busan transport hub elements

Taek Young Lee, R.G. Korol' ✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉kingkhv27@mail.ru

### Abstract

The organization of the Trans-Korean Railway with access to the continental railway network will allow the formation of new transport and logistics chains in which the foreign trade container traffic will be concentrated in the Busan transport hub (Republic of Korea). The main international container lines pass through the port Busan, where containers are transhipped from the ports of Southeast Asia and China to sea vessels for delivery to the Far Eastern ports of Russia, which is the main link in the transport and logistics chains of parallel imports. Today, the terminal and logistics infrastructure of the port Busan cannot manage the processing of increasing volumes of container traffic, sea and land transport is idle waiting for technological operations, which leads to logistical risks. The purpose of this article is to determine the reserves of the processing capacity of the Busan transport hub, taking into account the reorientation of part of the container traffic to rail transport. To achieve this goal, a program was developed to assess the processing capacity of the elements of the transport hub with the change in container traffic volume. The objectives of this study are to analyze the volume of container processing in the port Busan, to develop a technological scheme for the interaction of infrastructure facilities and to simulate the operation of subsystems of the Busan transport hub.

The subject of this study is the transport and terminal logistics infrastructure of the Busan transport hub. Theoretical and mathematical research methods, including modeling, visualization and comparison, are used in this work. The article presents the results of two modeling scenarios - with existing volumes of work and with infrastructural re-equipment for processing future container flow. A phased development of the processing capacity of the Busan transport hub is proposed, including infrastructure modernization, organizational, technological and technical measures.

### Keywords

simulation modeling, terminal and logistics infrastructure, transport hub, Busan port

### For citation

Taek Young Lee, Korol' R.G. Imitatsionnoe modelirovanie i otsenka pererabatyvayushchei sposobnosti elementov transportnogo uzla Pusan [Simulation modeling and evaluation of processing capacity of Busan transport hub elements]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 171–180. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).171-180.

### Article Info

Received: September 6, 2022; Revised: September 19, 2022; Accepted: September 20, 2022.

### Введение

На формирование транспортно-логистических цепей в Республике Корея (РК) влияют география, топография и история. РК является полуостровным государством, на севере граничит с Корейской Народной Демократической Республикой, поэтому международные перевозки связаны с развитием морского и воздушного транспорта, внутренние перевозки в основном осуществляются автомобильным и железнодорожным транспортом. Каждый вид транспорта в рамках транспортной системы РК, выполняет определенную функцию в соответствии с технико-экономическими особенностями, провозной и пропускной способностью, географическими и историческими особенностями развития. Железнодорожный транспорт в РК, по сравнению с автомобильным, в сфере организации грузовых перевозок имеет долю 2 % (рис. 1). При этом железнодорожный транспорт наиболее востребован среди населения для осуществления высокоскоростных пассажирских перевозок между крупными города-

ми на средние и дальние расстояния.

В настоящее время инфраструктура железнодорожного транспорта РК развивается для внутренних перевозок, так как не имеет выхода на континентальную транспортную сеть. Политическое и экономическое сотрудничество двух стран Корейского полуострова позволит обеспечить интеграцию железных дорог РК в международную транспортную сеть, что потребует корректировки плана развития железнодорожной отрасли в связи с перспективным увеличением грузопотока.

Организация Транскорейской железнодорожной магистрали с примыканием к железным дорогам Китая и Транссибирской магистрали активизирует переход с морского транспорта на железнодорожный транспорт грузоотправителей, ориентированных на рынки сбыта в странах СНГ и Юго-Восточной Азии, так как транспортировка грузов наземным транспортом позволит сократить стоимость и время доставки. Для стран Азиатско-Тихоокеанского региона появится возможность организации мультимо-

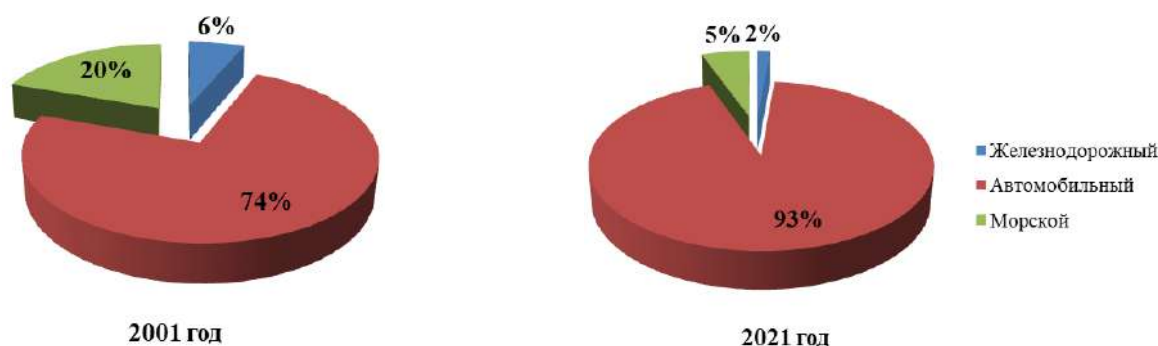


Рис. 1. Долевое распределение объема внутренних грузоперевозок Республики Корея по видам транспорта в 2001 и 2021 г.

Fig. 1. The share distribution of the volume of domestic cargo transportation of the Republic of Korea by means of transport in 2001 and 2021 years

дальних перевозок грузов железнодорожным транспортом с прямым выходом на морской порт Пусан (РК) и отправки грузов морским транспортом. Актуальным является исследование загрузки транспортно-логистических элементов и выявление резервов перерабатывающей способности транспортного узла Пусан.

### Характеристика транспортного узла Пусан

Используя морские пути сообщения, РК осуществляет перевозку 99,7 % внешнеторговых грузов. Общее количество портов РК составляет 50, из них 28 работают с экспортно-импортными грузами, остальные порты занимают каботажными перевозками между портами страны [1]. В табл. представлена характеристика терминально-логистической инфраструктуры и показатели перерабатывающей способности основных портов РК: Пусан, Ульсан, Кванъян, Инчхон и Пхентхэк Танджин. Наиболее крупным портом РК является порт Пусан, в 2021 г. перерабатывающая способность составила более 414 млн т [2].

Анализ инфраструктурного оснащения терминально-логистических объектов морских портов РК позволяет установить, что наибольшие площади и вместимость открытых площадок, предназначенных в первую очередь для работы с контейнерами, размещаются в портах Пусан и Инчхон. Основной объем переработки генеральных грузов обеспечивается в порту Кванъян.

Транспортный узел Пусан увеличил перерабатывающие мощности путем строитель-

ства в 2010 г. дополнительных терминалов – Новый порт Пусан, который специализирован под обработку крупнотоннажных контейнеров [2]. Новый порт Пусан включает три причала на северном контейнерном терминале, два причала на южном терминале и многофункциональный терминал на восточном направлении. Железнодорожная станция, обслуживающая Новый порт Пусан, расположена в 6 км к северу от порта, к станции примыкают железнодорожные пути, ведущие к ст. Букчолсонгжанг, которая расположена на северном контейнерном терминале, и к ст. Намчолсонгжанг, которая обслуживает южный контейнерный терминал.

В 2021 г. на терминалах порта Пусан было обработано более 22,7 млн контейнеров (рис. 2), из общего контейнеропотока 68,5 % было сконцентрировано на терминалах Нового порта Пусан. В 2020 г. эпидемиологические ограничения повлияли на деятельность порта Пусан, общий объем контейнерных перевозок уменьшился. За восемь месяцев 2022 г. контейнерооборот порта Пусан составил 15 022 тыс. контейнеров [3]. Достижение показателей работы транспортного узла Пусан обеспечивается за счет развития железнодорожной инфраструктуры на этапе строительства Нового порта Пусан, что позволяет повысить эффективность взаимодействия порта Пусан и железной дороги.

Удельный вес автомобильных перевозок при завозе / вывозе контейнеров на терминалы порта Пусан составляет 94,3 %, такая ситуация характерна для всей транспортно-

**Таблица 1.** Терминально-логистическая характеристика и перерабатывающая способность основных морских портов Республики Корея

**Table 1.** Terminal and logistics characteristics and processing capacity of the main seaports of the Republic of Korea

Порты Ports	Причальная стенка, м mooring wall, m	Площадь складов генеральных грузов тыс. м <sup>2</sup> General cargo warehouses area, thousand square meters	Вместимость складов генеральных грузов, тыс. т General cargo warehouse capacity thousand t	Площадь контейнерных терминалов, тыс. м <sup>2</sup> Container terminals' area, thousand square meters	Вместимость открытых площадок, тыс. т Open site capacity, thousand t	Перерабатывающая способность, млн т Processing capacity, mln t
Инчхон Incheon	25 988	115,6	186,1	4 098,8	10 840,5	144,204
Пхентхэк Танджин Pyeongtak Dangjin	14 424	73,9	253,2	2 313,3	6 940,6	97,504
Кванъян Kwangyang	24 981	2 298,4	7 840,0	1 998,5	3 997,1	211,238
Пусан Busan	32 561	124,5	81,3	2 609,9	18 171,7	414,093
Ульсан Ulsan	20 668	56,4	464,8	1 223,9	3 631,3	78,816

логистической отрасли РК. Объем железнодорожных контейнерных перевозок снизился и в 2021 г. составил 5,7 % от общего объема завоза / вывоза контейнеров в порт Пусан (рис. 2). Это связано с уровнем развития инфраструктуры, конкурентоспособностью и тенденциями логистического рынка. Увеличение объемов перевозки грузов морским транспортом по всей номенклатуре грузов требует разработки этапов развития портовых мощностей, обеспечивающих хранение и переработку дополнительных объемов грузо- и контейнеропотоков. До 2025 г. на базе порта Пусан планируется создание мирового транспортно-логистического хаба с объемом работы 30 млн контейнеров.

Организация железнодорожного сообщения между Южной и Северной Кореей позволит повысить востребованность и загрузку железнодорожного транспорта путем формирования транспортно-логистических цепей доставки транзитных грузов на направлении «Азия – Европа – Азия» с учетом передачи внешнеторгового контейнеропотока с морского транспорта на железнодорожный транспорт [4]. Для оценки текущей загруженности железнодорожной и терминально-логистической инфраструктуры транспортного узла Пусан в условиях изменения объемов поступающего контейнеропотока в Дальневосточном государственном университете путей сообщения была разработана программа оценки перерабатывающей способности элементов транспортного узла при изменении

объемов контейнеропотока [5]. Особенность программы заключается в представлении комплексного анализа загруженности элементов транспортного узла с учетом различных вариантов технического и инфраструктурного оснащения. Имитационное моделирование позволяет определить инфраструктурно-технологические элементы, ограничивающие производительность системы [6–8].

### Имитационное моделирование перерабатывающей способности элементов транспортного узла

Разработанная авторами программа является универсальной и позволяет исследовать процесс переработки внешнеторговых контейнерных грузов на примере инфраструктурного оснащения транспортного узла Пусан. Технологический процесс перемещения контейнеров между основными элементами транспортного узла Пусан реализуется последовательностью следующих операций:

- прибытие морских судов и железнодорожных составов;
- завоз / вывоз контейнеров автомобильным транспортом;
- грузовые операции на контейнерных площадках железнодорожного транспорта и причалов порта;
- перемещение внутритерминальных автоперевозчиков контейнеров по маршруту «контейнерная площадка железнодорожного транс-

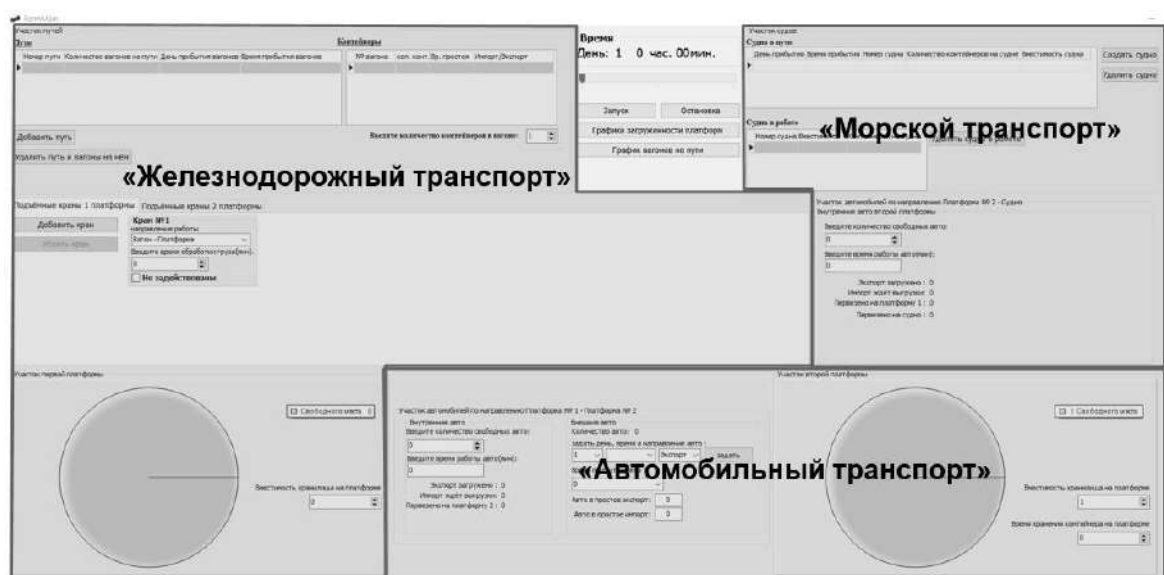


Рис. 3. Интерфейс ввода исходных данных в программу имитационного моделирования  
Fig. 3. Interface for input of source data into the simulation program

порта – контейнерная площадка морского порта».

Перечисленные технологические операции выполняются с учетом имеющихся инфраструктурных ограничений, влияющих на перерабатывающую и пропускную способность узла. Визуальный интерфейс программы представлен на рис. 3.

Интерфейс программы включает три взаимодействующих вида транспорта в узле: железнодорожный, морской и автомобильный. Каждый вид транспорта характеризуется инфраструктурными и технико-технологическими параметрами: транспортная инфраструктура (количество и вместимость путей припортового железнодорожного парка, вместимость причальной стенки порта, контейнеровместимость судов и вагонов); терминально-логистическая инфраструктура (емкость контейнерных площадок, количество подъемно-транспортных механизмов, количество внутри-терминальных машин). Учитывается также неравномерность прибытия и отправления железнодорожного, автомобильного и морского транспорта [9]. Имитационное моделирование осуществляется на основе временных параметров работы взаимодействующих элементов транспортного узла: дата и время прибытия судов, пе-

редаточных поездов и внешних автомобилей, продолжительность выполнения грузовых операций с контейнерами на каждом этапе обработки, срок хранения контейнеров на площадках, технологическое время на перемещение контейнеров внутритерминальными автомобилями (рис. 4). Логика моделирования построена на последовательном перемещении транзакта по этапам технологического процесса переработки контейнеров в транспортном узле. Время перемещения и нахождения транзакта (контейнера) на каждом этапе процесса моделирования зависит от продолжительности совершения технологических операций с контейнером на каждом элементе транспортного узла [10].

Основной объем контейнеропотока проходит через южный контейнерный терминал Нового порта транспортного узла Пусан, который обслуживается железнодорожной станцией, включающей парк приема и восемь погрузочно-разгрузочных путей, также на территории станции расположена контейнерная площадка (участок 1). Контейнерный терминал морского порта состоит из двух основных технологических зон – зона грузовых операций с судами и зона накопления контейнеров для по-



**Рис. 4.** Технологическая схема работы Пусанского транспортного узла:

( $t_1$  – время грузовых операций с судами;  $t_2$  – время грузовых операций с внутритерминальным автотранспортом на причале порта;  $t_3$  – продолжительность перемещения контейнеров внутритерминальными автомобилями с грузового фронта причала на контейнерную площадку порта;  $t_4$  – время грузовых операций с внутритерминальным автотранспортом на контейнерной площадке порта;  $t_5$  – время грузовых операций на контейнерной площадке порта с внешними и внутритерминальными автомобилями;  $t_6$  – продолжительность перевозки контейнеров внутритерминальными автомобилями с контейнерной площадки порта на железнодорожную контейнерную площадку;  $t_7$  – время грузовых операций с внутритерминальным автотранспортом на железнодорожной контейнерной площадке;  $t_8$  – время грузовых операций с железнодорожным подвижным составом

(в программе единицей времени является минута)

**Fig. 4.** Technological scheme of the Busan transport hub:

$t_1$  – time of cargo operations with ships;  $t_2$  – time of cargo operations with terminal vehicles at the port berth;  $t_3$  – duration of container movement by terminal vehicles from the cargo front of the berth to the container platform of the port;  $t_4$  – time of cargo operations with terminal vehicles on the container platform of the port;  $t_5$  – time of cargo operations on the container platform of the port with external and terminal vehicles;  $t_6$  – duration of transportation containers are intra – terminal by vehicles from the container site of the port to the railway container site;  $t_7$  – time of cargo operations with intra – terminal vehicles at the railway container site;  $t_8$  – time freight operations with railway rolling stock (in the program, the unit of time is a minute)



следующей передачи на железнодорожный и автомобильный транспорт (участок 2). Перемещение контейнеров между участками осуществляют внутртерминальные автотранспортные средства. Программа имитационного моделирования функционирует на основе статистических данных о количестве прибывающих контейнеров, нахождении судов на причалах порта, вагонов на станции и грузового внешнего автотранспорта на территории морского порта, фактической вместимости контейнерных площадок, среднем времени обработки и хранения контейнеров на каждой контейнерной площадке [11].

Целью имитационного моделирования работы транспортного узла Пусан (Новый порт Пусан) в условиях неравномерности прибытия железнодорожного, автомобильного и морского транспорта, а также при максимальных суточных объемах поступления и переработки контейнеров является оценка степени загрузки контейнерных площадок, подъемно-транспортного оборудования и занятости путей железнодорожного парка припортовой станции. Оценка степени загруженности терминально-логистических объектов и наличия резервов перерабатывающей способности железнодорожной подсистемы транспортного узла Пусан происходит путем сопоставления результатов имитационного моделирования переработки среднесуточных объемов вагонопотока при су-

ществующем инфраструктурном оснащении и в условиях технического переоснащения железнодорожной контейнерной площадки с увеличением объемов поступающего контейнеропотока [12]. Для инициализации имитационной модели использованы следующие входные данные (рис. 5): ежесуточное прибытие 30 поездов; состав передаточного поезда 33 вагона; 2 контейнера на платформе; 4 подъемно-транспортных механизма на железнодорожном контейнерном терминале; 8 погрузочно-выгрузочных железнодорожных путей. Контейнерные площадки порта принадлежат компаниям АО «PNIT», АО «PNC», АО «HJNC» с общей вместимостью 10 650 контейнеро-мест. Временной период моделирования – 7 сут.

Анализ графика загруженности железнодорожной контейнерной площадки транспортного узла Пусан (см. рис. 5) показывает, что при заданном среднем времени обработки подъемно-транспортными механизмами поступающего вагонопотока с учетом выходного дня (день простоя), когда не прибывают поезда, количество вагонов на путях станции в ожидании грузовых операций составляет 91 вагон, соответственно, с увеличением периода моделирования количество вагонов в железнодорожном парке будет продолжать накапливаться, что может привести к нехватке железнодорожных путей для приема поездов. При этом загруженность железнодорожной контейнерной



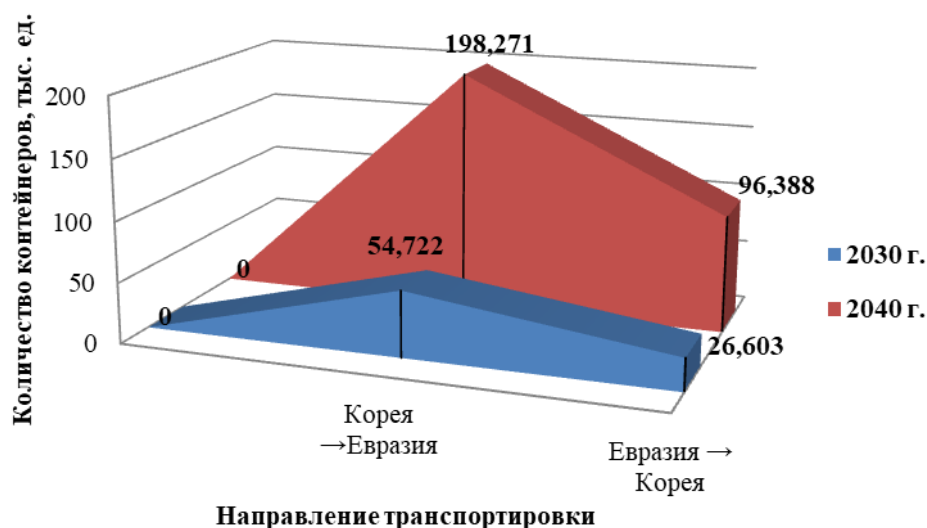
**Рис. 5.** Результаты имитационного моделирования работы железнодорожной контейнерной площадки транспортного узла Пусан при существующих объемах поступающего вагонопотока

**Fig. 5.** Results of simulation modeling of the railway container platform operation at the Busan transport hub with the existing volumes of incoming wagons

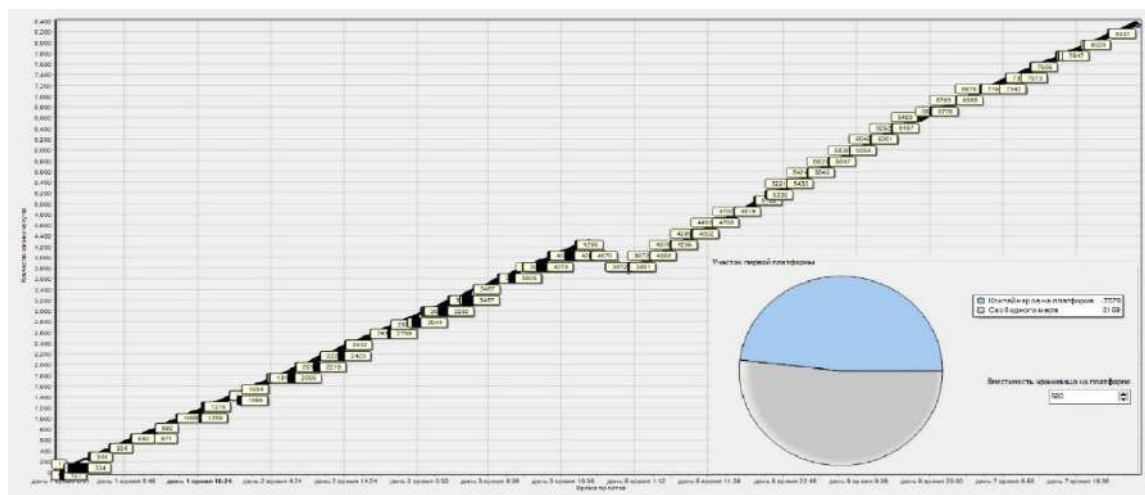
площадки составляет не более 60 %, она имеет достаточный резерв для обработки поступающего контейнеропотока. Таким образом, лимитирующим звеном железнодорожной подсистемы транспортного узла Пусан является недостаточное количество погрузочно-выгрузочных путей и подъемно-транспортного оборудования. В условиях перенаправления транзитного контейнеропотока на железнодорожный транспорт требуется реализация мероприятий по усилению железнодорожной инфраструктуры и техническому переоснащению

терминальных объектов [13]. Согласно прогнозам специалистов транспортной отрасли и ученых Южной Кореи [14], транспортировка контейнеров из РК в западном направлении может составить к 2030 г. более 54 млн TEUs и к 2040 г. увеличиться в четыре раза, достигнув значения порядка 200 млн контейнеров (рис. 6).

На рис. 7 визуализированы результаты имитационного моделирования при увеличении объема поступающего вагонопотока и инфраструктурном переоснащении железнодорожной контейнерной площадки транспортного узла



**Рис. 6.** Прогнозные значения объемов контейнерных железнодорожных перевозок на направлении «Республика Корея – Евразия – Республика Корея»  
**Fig. 6.** Forecast values of container rail traffic volumes on the route «Republic of Korea – Eurasia – Republic of Korea»



**Рис. 7.** Результаты имитационного моделирования работы железнодорожной контейнерной площадки транспортного узла Пусан при увеличении объемов поступающего вагонопотока и инфраструктурном переоснащении  
**Fig. 7.** The results of simulation modeling of the railway container site operation at the Busan transport hub with an increase in the bulk of incoming wagons and infrastructural re-equipment

Пусан: ежедневное прибытие 60 поездов, состав передаточного поезда 33 вагона, два контейнера на платформе, 6 подъемно-транспортных механизма на железнодорожном контейнерном терминале с круглосуточным режимом работы, 12 погрузочно-выгрузочных путей железнодорожного парка, временной период моделирования – 7 суток.

Результаты имитационного моделирования (см. рис. 7) в условиях интенсивного поступления вагонов с контейнерами, увеличения количества железнодорожных путей и механизмов показывают, что на четвертые сутки (день простоя) было обработано в 5 раз больше вагонов относительно первых результатов моделирования, при этом происходит накопление значительного вагонопотока на путях станции в ожидании обработки козловыми кранами. В выходной день (четвертый день), когда не прибывают вагоны на станцию, подъемно-транспортное оборудование не справляется с поступающим контейнеропотоком и при дальнейшем интенсивном поступлении вагонов произойдет заполнение подвижным составом путей железнодорожного парка, что приведет к нарушению стабильного функционирования железнодорожной подсистемы транспортного узла Пусан. Существенное влияние на процессы переработки контейнеропотока оказывают временные параметры: продолжительность грузовых операций, технологические операции с подвижным составом, время хранения грузов и таможенных процедур, а также время перемещения внутри-терминального автотранспорта на участке «железнодорожная контейнерная площадка – контейнерная площадка морского порта – железнодорожная контейнерная площадка» [15–17]. Учитывая полученные результаты имитационного моделирования работы транспортного узла, необходимо комплексно подходить к развитию пропускной и перерабатывающей способности элементов транспортного узла Пусан, рассматривая инфраструктурные, технические и организационно-технологические мероприятия [18].

### Заключение

Имитационное моделирование является инструментом, позволяющим учесть множество переменных системы и в динамическом состоянии проанализировать работоспособность отдельных элементов и подсистем рассматриваемого объекта [19]. Моделирование таких сложных систем, как транспортный узел,

который включает объекты различных видов транспорта, требует учета технологических цепочек передачи контейнеров в данной системе и особенностей функционирования инфраструктурных элементов каждого вида транспорта в узле [20–22]. Авторами проведена научно-исследовательская работа, посвященная оценке перерабатывающей способности элементов транспортного узла Пусан при увеличении объемов поступающего контейнеропотока железнодорожным транспортом. Разработанная программа имитационного моделирования является универсальной, при этом имеет следующие допущения:

- динамическим объектом в программе является контейнер, другие грузы не учитываются;
- существует ограничение на количество используемого погрузочно-разгрузочного оборудования на причалах порта, отсутствует разделение технологических зон по причалам;
- время прибытия внешних автомобилей, осуществляющих завоз и вывоз контейнеров, задается случайными периодами.

Результаты имитационного моделирования представлены в виде графиков (см. рис. 5, 7) функционирования железнодорожной площадки транспортного узла Пусан в условиях увеличения количества прибывающих поездов при существующей технологии работы и времени на выполнение технологических и терминальных операций. С учетом инфраструктурного переоснащения железнодорожной подсистемы транспортного узла и двукратном увеличении обрабатываемого вагонопотока, подсистема не способна функционировать в нормальном режиме, что может привести к проблемам в работе всего Пусанского транспортного узла.

В настоящее время большая часть импортных и экспортных контейнеров (см. рис. 1) перевозится автомобильным транспортом в РК, в том числе через транспортный узел Пусан. Это означает, что необходима разработка оптимальных мер с учетом всех аспектов организации, технологии и инфраструктурного оснащения подсистем транспортного узла для постепенной передачи контейнерных перевозок на железнодорожный транспорт. Поэтому требуется поэтапное развитие пропускной и перерабатывающей способностей элементов транспортного узла, включающее организационно-технологические, технические и инфраструктурные решения.

## Список литературы

1. Ли Т.Е., Король Р.Г. Развитие транспортного узла Пусан для организации транскореяских железнодорожных перевозок // Изв. Транссиба. 2021. № 1 (45). С. 122–133.
2. A study to establish a complex logistics network connecting port-continental railways / E.K. Lee, J.W. Seo, G.S. Kil et al. // National Research Council for Economics, Humanities and Social sciences. 2018. Vol. 61. P. 146.
3. Container Statistics of Busan Port 2021 // IAPH : site. URL: <https://www.iaphworldports.org/memberports/busan-port-authority/> (дата обращения: 8.09.2022).
4. Светличная С.А. Совершенствование системы распределения международных грузопотоков внутри припортового транспортного узла // Технологический аудит и резервы производства. 2013. Т. 5. № 5 (13). С. 12–14.
5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022610998, Российская Федерация. Программа оценки перерабатывающей способности элементов транспортного узла при изменении объемов контейнеропотока / Р.Г. Король, Т.Е. Ли: № 2022610264 : заявл. 12.01.2022 : опубл. 18.01.2022. Бюл. №1. 1 с.
6. Козлов П.А., Колокольников В.С., Копылова Е.В. Об имитационном моделировании и имитационных системах // Транспорт Урала. 2019. № 1 (60). С. 3–6.
7. Новиков П.А. Имитационной метод динамического согласования (И-МДС) как аппарат оптимизации сложных технологических процессов на транспорте // Транспорт Урала. 2008. № 3 (18). С. 10–12.
8. Клименко В.В., Морозов А.Н., Проценко О.Д. Моделирование логистической инфраструктуры транспортного узла // Логистика и управление цепями поставок. 2014. № 1 (60). С. 21–29.
9. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system / O. Chislov, V. Bogachev, A. Kravets et al. // Transport Problems. 2021. Vol. 16, № 2. P. 153–165.
10. Ташлыкова А.И. Имитационное моделирование для оценки влияния факторов на продолжительность простоя груза в транспортном узле // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 12-5 (66). С. 156–160.
11. Нечипорук М.В., Анисимов В.А. Имитационное моделирование развития Ванино-Совгаванского мультимодального транспортного узла // Бюл. результатов науч. исслед. 2022. № 3. С. 73–88.
12. Шрамко А.П. Моделирование пропускной способности объединенного транспортного узла с учетом увеличения грузопотоков // Эксплуатация морского транспорта. 2016. № 2 (79). С. 16–24.
13. Копылов М.А. Повышение резерва пропускной способности транспортного узла // Молодой исследователь Дона. 2020. № 2 (23). С. 35–40.
14. Determining values of design parameters for a rail transportation terminal in a container port / B.J. Jeong, B.K. Lee, K.H. Kim et al. // Korean institute of industrial engineers. 2007. Vol. 20, № 4. P. 469–478.
15. Куфтинова Н.Г. Возможности использования имитационного моделирования для анализа транспортных узлов // Транспортное планирование и моделирование : сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2017. С. 175–179.
16. Андронов С.А., Ульячева О.В. Оценка и повышение пропускной способности транспортного узла посредством имитационного моделирования в среде PTV VISSIM // Системный анализ и логистика. 2022. № 2 (32). С. 113–129.
17. Володарец Н.В., Белоусова Т.П. Имитационное моделирование рабочих процессов в транспортном узле в условиях эксплуатации на основе anylogic // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2018. № 1 (5). С. 244–248.
18. Ли Т.Е., Король Р.Г. Обоснование этапности развития транспортного узла Пусан (Республика Корея) в условиях роста объема перевозок // Транспорт Урала. 2021. № 4 (71). С. 52–57.
19. Рудин Р.Ю. Решение транспортных задач с помощью имитационного моделирования // Достижения науки и образования. 2016. № 11 (12). С. 12–16.
20. Рахмангулов А.Н., Муравьев Д.С. Сценарный подход к развитию морской портовой инфраструктуры с использованием имитационного моделирования // Проблемы инфраструктуры транспортного комплекса : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Санкт-Петербург, 2015. С. 108–112.
21. Мазуренко О.И., Русинов И.А. Моделирование тылового грузового фронта морского угольного терминала // Вестн. гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021. Т. 13. № 5. С. 636–650.
22. Хашев А.И., Мамаев Э.А., Гуда А.Н. Комбинированное имитационно-аналитическое моделирование в транспортно-логистических системах // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 1 (85). С. 117–125.

## References

1. Lee T.Y., Korol' R.G. Razvitiye transportnogo uzla Pusan dlya organizatsii transkorejskikh zheleznodorozhnykh perevozok [Busan transport hub development for trans-korean railway transportation]. *Izvestija Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2021, no. 1(45), pp. 122–133.
2. Lee E.K., Seo J.W., Kil G.S., Lee S.W., Kang M.H., Choi G.W., Lee S.Y., Kim B.K., Kim E.J., Choi S.W. A study to establish a complex logistics network connecting port-continental railways. *National Research Council for Economics, Humanities and Social sciences*, 2018, vol. 61, P. 146.
3. Container Statistics of Busan Port 2021. Available at: <https://www.iaphworldports.org/memberports/busan-port-authority/> (Accessed September 8, 2022).
4. Svetlichnaya S.A. Sovershenstvovanie sistemy raspredeleniya mezhdunarodnykh gruzopotokov vntri priportovogo transportnogo uzla [Improving the system of international freight traffic distribution in port transportation hub]. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva* [Technology Audit and Production Reserves], 2013, vol. 5, no. 5(13), pp. 12–14.
5. Korol R.G., Lee T.Y. Certificate of registration of the computer program RU 2022610998, 18.01.2022.

6. Kozlov P.A., Kolokol'nikov V.S., Kopylova E.V. Ob imitatsionnom modelirovanii i imitatsionnykh sistemakh [About simulation modeling and simulation systems]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2019, no. 1(60), pp. 3–6.
7. Novikov P.A. Imitatsionnyi metod dinamicheskogo soglasovaniya (I-MDS) kak apparat optimizatsii slozhnykh tekhnologicheskikh protsessov na transporte [Simulation method of dynamic co-ordination (SMDC) as a means for optimization of complex technological processes on transport]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2008, no. 3(18), pp. 10–12.
8. Klimenko V.V., Morozov A.N., Protsenko O.D. Modelirovanie logisticheskoi infrastruktury transportnogo uzla [Modeling of the logistics infrastructure of a transport hub]. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* [Logistics and supply chain management], 2014, no. 1(60), pp. 21–29.
9. Chislov O., Bogachev V., Kravets A., Bogachev T., Zadorozhnyi V., Bakalov M. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system. *Transport Problems*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 153–165.
10. Tashlykova A.I. Imitatsionnoe modelirovanie dlya otsenki vliyaniya faktorov na prodolzhitel'nost' prostoya gruza v transportnom uzle [Simulation modeling for evaluation of influence of factors on duration of cargo downtime in transport hub]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International Scientific Research Journal], 2017, no. 12-5(66), pp. 156–160.
11. Nechiporuk M.V., Anisimov V.A. Imitatsionnoe modelirovanie razvitiya Vanino-Sovgavanskogo mul'timodal'nogo transportnogo uzla [Simulation modeling of Vanino-Sovgavan multimodal transport node development]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [The Bulletin of Scientific Research Results], 2022, no. 3, pp. 73–88.
12. Shramko A.P. Modelirovanie propusknoi sposobnosti ob"edinennogo transportnogo uzla s uchetom uvelicheniya gruzopotokov [Modeling of capacity of the integrated transport hub taking into account increase in freight traffics]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta* [Operation of marine transport], 2016, no. 2(79), pp. 16–24.
13. Kopylov M.A. Povyshenie rezerva propusknoi sposobnosti transportnogo uzla [The reserve increasing of the transport node bandwidth]. *Molodoi issledovatel' Dona* [Young researcher of the Don], 2020, no. 2(23), pp. 35–40.
14. Jeong B.J., Lee B.K., Kim K.H., Seo J.H., Park S.O. Determining values of design parameters for a rail transportation terminal in a container port. Korean institute of industrial engineers, 2007, pp. 469–478.
15. Kuftinova N.G. Vozmozhnosti ispol'zovaniya imitatsionnogo modelirovaniya dlya analiza transportnykh uzlov [The possibility of using simulation for the analysis of transport nodes]. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnoe planirovanie i modelirovanie»* [Proceedings of II International Scientific and Practical Conference «Transport Planning and Modeling»]. Saint-Petersburg, 2017, pp. 175–179.
16. Andronov S.A., Ul'vacheva O.V. Otsenka i povyshenie propusknoi sposobnosti transportnogo uzla posredstvom imitatsionnogo modelirovaniya v srede PTV VISSIM [Assessment and increase of the capacity of the transport hub through simulation in The PTV VISSIM environment]. *Sistemnyi analiz i logistika* [System analysis and logistics], 2022, no. 2(32), pp. 113–129.
17. Volodarets N.V., Belousova T.P. Imitatsionnoe modelirovanie rabochikh protsessov v transportnom uzle v usloviyakh ekspluatatsii na osnove anylogic [Simulation of working processes in a transport node under the operating conditions on the basis of anylogic]. *Sovremennye innovatsionnye tekhnologii podgotovki inzhenernykh kadrov dlya gornoj promyshlennosti i transporta* [Modern innovative technologies of engineering personnel training for mining and transport], 2018, no. 1(5), pp. 244–248.
18. Lee T.Y., Korol R.G. Obosnovanie etapnosti razvitiya transportnogo uzla Pusan (Respublika Koreya) v usloviyakh rosta ob"ema perevozok [Justification of the stages of development of The Busan transport hub (Republic of Korea) in the context of an increase in the volume of traffic]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2021, no. 4(71), pp. 52–57.
19. Rudin R. Yu. Reshenie transportnykh zadach s pomoshch'yu imitatsionnogo modelirovaniya [Solving transport problems using simulation modeling]. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya* [Achievements of science and education], 2016, no. 11(12), pp. 12–16.
20. Rakhmangulov A.N., Murav'ev D.S. Stsenarnyi podkhod k razvitiyu morskoi portovoi infrastruktury s ispol'zovaniem imitatsionnogo modelirovaniya [Scenarios approach of sea port infrastructure development with simulation modeling using]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnoe planirovanie i modelirovanie»* [Proceedings of International Scientific and Practical Conference «Transport Planning and Modeling»]. Saint-Petersburg, 2015, pp. 108–112.
21. Mazurenko O.I., Rusinov I.A. Modelirovanie tylovogo gruzovogo fronta morskogo ugol'nogo terminala [Simulation modeling of the rear cargo fronts of marine coal terminals]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* [Bulletin of state university sea and river fleet named after S.O. Makarov], 2021, vol. 13, no. 5, pp. 636–650.
22. Khashev A.I., Mamaev E.A., Guda A.N. Kombinirovannoe imitatsionno-analiticheskoe modelirovanie v transportno-logisticheskikh sistemakh [The combined simulation and analytical modeling in transport and logistics systems]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State Transport University], 2022, no. 1(85), pp. 117–125.

### Информация об авторах

**Ли Тэк Енг**, соискатель кафедры технологии транспортных процессов и логистики, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: emyahoo21@nate.com.

**Король Роман Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии транспортных процессов и логистики, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: kingkhv27@mail.ru.

### Information about the authors

**Taek Young Lee**, applicant of the Department of Technology of transport processes and logistics, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk; e-mail: emyahoo21@nate.com.

**Roman G. Korol**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Technology of transport processes and logistics, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk; e-mail: kingkhv27@mail.ru.

## Моделирование ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Юрты – Нижнеудинск при реализации систем интервального регулирования

Е.Ю. Пузина<sup>1,2</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

✉lena-rus05@mail.ru

### Резюме

В настоящее время в ОАО «РЖД» актуальной задачей, направленной на повышение пропускной способности существующих электрифицированных направлений железных дорог, является внедрение современных систем интервального регулирования, способствующих существенному снижению межпоездных интервалов. К таким системам относят микропроцессорную систему с тональными рельсовыми цепями с центральным размещением аппаратуры в шкафом варианте и виртуальную сцепку. Реализация названных систем несомненно вызовет значительный рост нагрузок в системах тягового и внешнего электроснабжения. Данный факт, в свою очередь, приведет к увеличению падения напряжения в контактной сети, возможно, сопровождающемуся снижением уровня напряжения на токоприемниках локомотивов до недопустимого значения. Обострение подобной ситуации проявится в ремонтных режимах системы внешнего электроснабжения особенно ярко, поскольку отключение ее звеньев приводит к еще большему росту нагрузок в остающихся в работе линиях электропередачи и силовых трансформаторах районных подстанций. Развитие этой ситуации будет способствовать также существенному снижению уровня напряжения в контактной сети. Эти факты необходимо учитывать и в связи с тем, что большая часть линий электропередачи и оборудования подстанций к настоящему времени имеет значительный износ. В рамках представленной работы выполнена оценка влияния ремонтных режимов системы внешнего электроснабжения на условия работы системы тягового электроснабжения на одном из сложных по профилю участков Восточно-Сибирской железной дороги при реализации указанных систем интервального регулирования. Разработаны предложения по техническому перевооружению системы электроснабжения исследуемого участка.

### Ключевые слова

системы интервального регулирования, силовые трансформаторы, ремонтные режимы, линии электропередачи, участок Юрты – Нижнеудинск

### Для цитирования

Пузина Е.Ю. Моделирование ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Юрты-Нижнеудинск при реализации систем интервального регулирования / Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 181–194. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).181-194.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 5.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 15.09.2022 г.; принята к публикации: 16.09.2022 г.

## Modeling of repair operation modes of the power supply system of the Yurts – Nizhneudinsk section during the implementation of interval control systems

Е.Yu. Puzina<sup>1,2</sup>✉

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

<sup>2</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

### Abstract

At present in JSC «Russian Railways», an urgent task aimed at increasing the capacity of existing electrified railway lines is the introduction of modern interval control systems that contribute to a significant reduction in inter-train intervals. Such systems include a microprocessor system with tonal rail circuits with central equipment placement of a cabinet version and a virtual coupling. The implementation of such systems will undoubtedly cause a significant loads increase both in the traction and the external power supply system. This fact, in turn, result in an increase in the voltage drop in the contact network, possibly accompanied by a decrease in the voltage level on the current collectors of locomotives to an unacceptable value. The aggravation of such a situation will manifest itself in the repair modes of the external power supply system especially vividly, since the disconnection of its links leads to an even greater increase in loads in the remaining power transmission lines and power transformers of district substations. The development of this situation will contribute to an even more significant reduction in the voltage level in the

contact network. These facts must also be taken into account due to the fact that most of the power transmission lines and substation equipment currently have significant wear. Within this work, an assessment of the impact of repair modes of the external power supply system on the operating conditions of the traction power supply system at one of the difficult sections of the East Siberian Railway under the implementation of these interval control systems was carried out. Proposals have been developed for the technical re-equipment of the power supply system of the studied area.

### Keywords

Interval control systems, power transformers, repair modes, power transmission lines, region Yurty – Nizhneudinsk

### For citation

Puzina E.Yu. Modelirovanie remontnykh rezhimov raboty sistemy elektrosnabzheniya uchastka Yurty-Nizhneudinsk pri realizatsii sistem interval'nogo regulirovaniya [Modeling of repair operation modes of the power supply system of the Yurts-Nizhneudinsk section during the implementation of interval control systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 181–194. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).181-194.

### Article Info

Received: September 5, 2022; revised: September 15, 2022; accepted: September 16, 2022.

### Введение

Моделирование систем электроснабжения с помощью программно-вычислительных комплексов позволяет оценить параметры нормальных и ремонтных режимов при существующих нагрузках и спрогнозировать необходимость их усиления при увеличении нагрузок [1, 2].

Выполнение данных задач особенно актуально применительно к системам электроснабжения железных дорог, поскольку в настоящее время осуществляется организация движения не только тяжеловесных поездов массой 7 100 т, но и на отдельных участках российских железных дорог сдвоенных поездов общей массой 14 200 т. Столь значительные массы грузовых поездов приводят к возникновению повышенных нагрузок на все элементы как системы тягового электроснабжения (СТЭ) (ТП – тяговые подстанции, КС – контактная сеть), так и на линии электропередачи (ЛЭП) и силовое оборудование подстанций системы внешнего электроснабжения (СВЭ) [3–7].

При наличии существенного многолетнего износа силового оборудования и ЛЭП на отдельных участках систем электроснабжения указанная ситуация особенно ярко может проявиться в их ремонтных режимах работы, когда элементы систем электроснабжения, остающиеся в работе, испытывают перегрузки. Во избежание развития аварий в подобных ситуациях и для обеспечения безопасности перевозочного процесса необходим предварительный анализ параметров ремонтных режимов при возрастающих нагрузках и при необходимости принятие решений о техническом перевооружении систем электроснабжения [8–11].

### Описание проблемной ситуации и постановка задачи

Выполнено моделирование систем внешнего и тягового электроснабжения участка Юрты – Нижнеудинск в программно-вычислительном комплексе (ПВК) Fazonord с целью оценки влияния ремонтных режимов в СВЭ на пропускную способность СТЭ при реализации двух современных систем интервального регулирования: автоматической локомотивной сигнализации основной (АЛСО), построенной на базе аппаратуры микропроцессорной системы с тональными рельсовыми цепями с центральным размещением аппаратуры в шкафом варианте (АБТЦ-МШ) и виртуальной сцепки (ВСЦ) [12–18].

Использование системы АЛСО на базе аппаратуры АБТЦ-МШ позволяет сократить межпоездной интервал за счет применения сигнализации без светофоров с подвижными блоками участками.

Технология виртуальной сцепки позволяет организовать движение пакета поездов (сдвоенной пары) на минимально безопасном расстоянии с отслеживанием информации между ними по цифровому радиоканалу.

Обе технологии интервального регулирования за счет значительного сокращения межпоездного интервала при перемещении тяжеловесных поездов существенно увеличивают загрузку на системы электроснабжения, особенно в ремонтных режимах работы, а также на звенья СВЭ, что может привести к невозможности осуществления перевозочного процесса. Вероятность таких ситуаций высока на участках, характеризующихся сложным профилем пути.

Исследуемый участок Юрты – Нижнеудинск характеризуется горным профилем с

затяжными подъемами в трех зонах. В зоне Тайшет – Восток – Облепиха два подъема: с максимальной высотой уклона 7,2 и 7,1 ‰, протяженностью 6 и 7 км соответственно. В зоне Замзор – Ук максимальная высота уклона составляет 8,2 ‰, протяженность 17 км. В зоне Ук – Нижнеудинск максимальная высота уклона составляет 8,4 ‰, протяженность 13 км.

В связи с имеющейся характеристикой профиля исследуемого участка и планируемым внедрением в его рамках систем АБТЦ-МШ и ВСЦ задача анализа ремонтных режимов работы СВЭ представляется актуальной.

### Оценка влияния ремонтных режимов работы системы внешнего электроснабжения на пропускную способность системы тягового электроснабжения участка Юрты – Нижнеудинск

Электроснабжение ТП участка Юрты – Нижнеудинск производится от сети 110 кВ, которая, в свою очередь, получает питание от подстанций энергосистемы Тайшет 500/110 кВ и Тулун 220/110 кВ. Схема электроснабжения по сети 110 кВ содержит тяговые подстанции Тайшет, Облепиха, Замзор, Ук, Нижнеудинск. Линии участка Юрты – Нижнеудинск одноцепные.

Для выполнения задачи моделирования исследуемого участка разработана его расчетная схема с целью применения в ПВК Fazonord, и сформированы два «пакета» движения тяжеловесных поездов:

1. Для исследования технологии АБТЦ-МШ (в четном направлении – восемь поездов массой 7 100 т, движущихся с интервалом 6 мин.; в нечетном направлении – тридцать поездов массой 3 100 т, движущихся с интервалом 12 мин.).

2. Для исследования технологии ВСЦ (в четном направлении – три поезда массой 6 100 т, движущихся с интервалом 8 мин., далее два поезда массой 7 100 т, движущихся по ВСЦ с интервалом 6 мин. и следом три поезда массой 6 100 т, движущихся с интервалом 8 мин.; в нечетном направлении – тридцать поездов массой 3 100 т, движущихся с интервалом 12 мин.).

В расчетах рассмотрены три наиболее тяжелых для исследуемого участка ремонтных режима:

- разрыв транзита 110 кВ Тайшет – Тулун на ТП Нижнеудинск;
- отключение воздушной линии (ВЛ) Тайшет – Силикатная;
- отключение ВЛ Замзор – Топорок.

Модель реализации первого ремонтного режи-

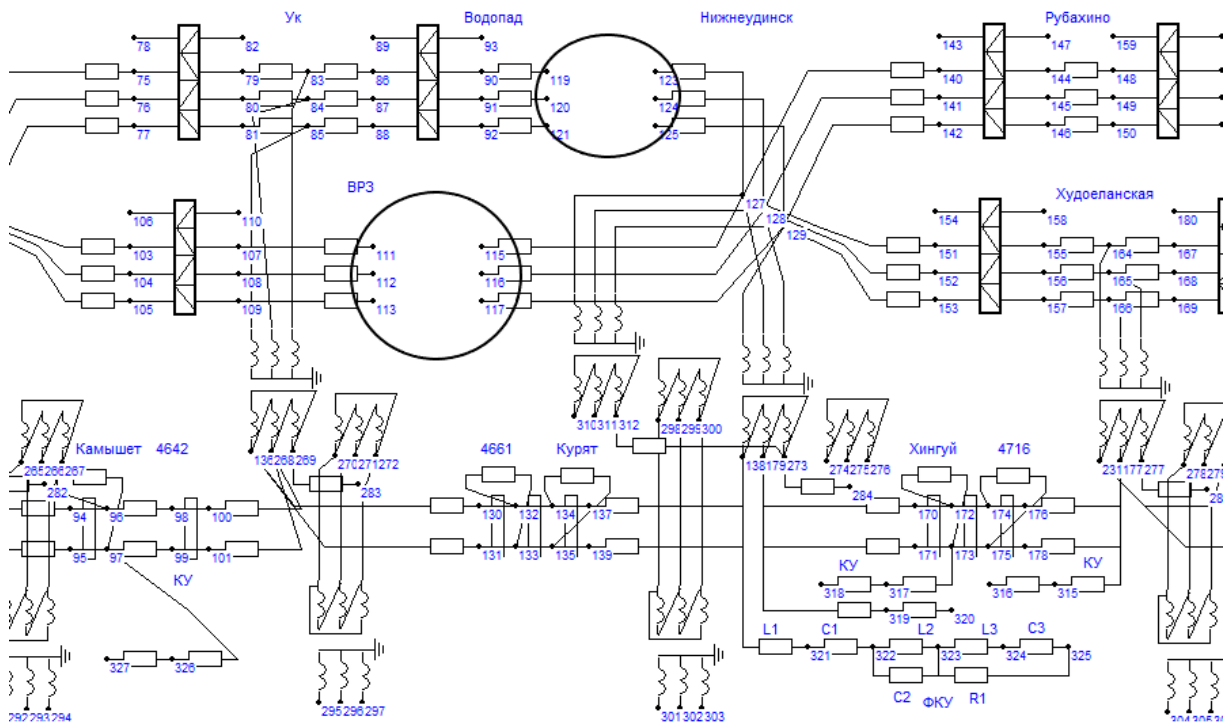


Рис. 1. Модель реализации первого ремонтного режима

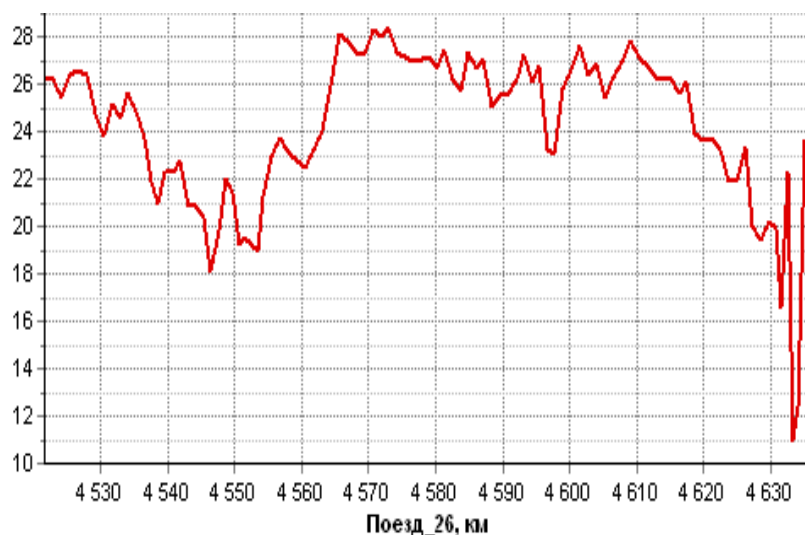
Fig. 1. Implementation model of the first repair mode



ма работы представлена на рис. 1. По результатам расчета получили при использовании системы АБТЦ-МШ график уровня напряжения в КС для тяжеловесного поезда четного направления движения, который представлен на рис. 2. Данные по нескольким поездам для систем АБТЦ-МШ и ВСЦ представлены в табл. 1.

Данные о загрузке силовых трансформаторов представлены в табл. 2.

Модель реализации второго ремонтного режима представлена на рис. 3. Полученный при этом график уровня напряжения в КС для тяжеловесного поезда четного направления при использовании АБТЦ-МШ представлен на



**Рис. 2.** График изменения напряжения четного поезда в первом ремонтном режиме  
**Fig. 2.** Graph of the voltage change of the even train in the first repair mode

**Таблица 1.** Параметры режима работы контактной сети в четном и нечетном направлениях (первый ремонтный режим)

**Table 1.** Parameters of the contact network operation mode in even and odd directions (first repair mode)

Тип поезда Train type	Минимальное напряжение в контактной сети, кВ Minimum voltage in the contact network, kV		Максимальный ток проводов контактной сети, А Maximum wire current contact network, A	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Четный even	11	12,0	934,3	875,3
Четный even	12,2	17,3	929,2	883,4
Нечетный odd	15,1	19,1	411,4	411,8
Нечетный odd	17,3	15,4	405,3	425,3

**Таблица 2.** Коэффициенты загрузки трансформаторов в первом ремонтном режиме  
**Table 2.** Load factors of transformers in the first repair mode

Наименование тяговой подстанции Name of the traction substation	Коэффициент загрузки трансформаторов Transformer load factor	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Тайшет	1,21	1,19
Облепиха	1,14	1,12
Замзор	2,05	2,01
Ук	2,16	2,07
Нижнеудинск	2,01	1,99

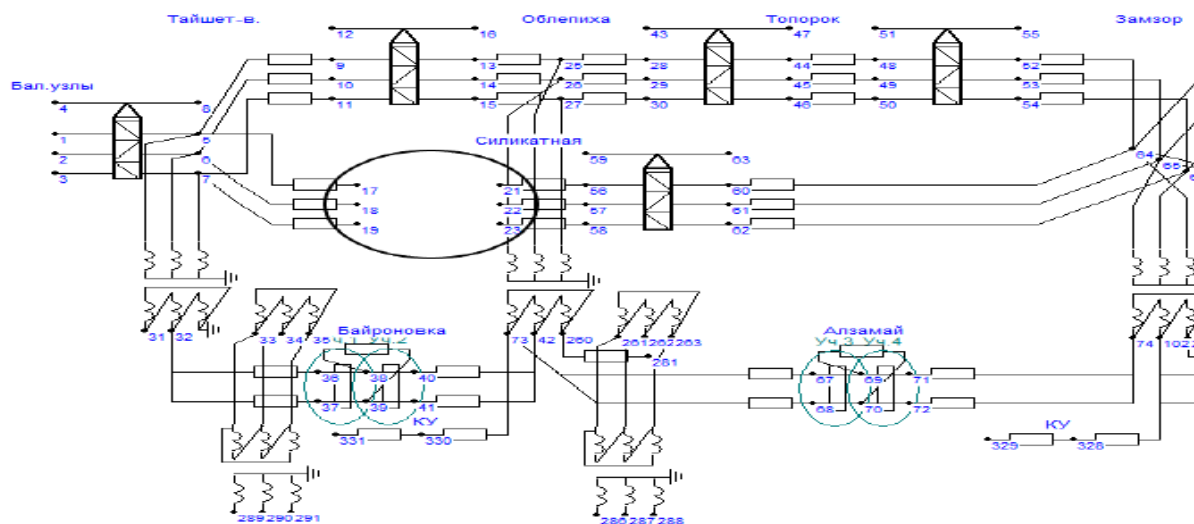
рис. 4. Данные о нескольких поездах в случае реализации обеих систем интервального регулирования представлены в табл. 3.

Данные о загрузке силовых трансформаторов во втором ремонтном режиме представлены в табл. 4. Модель третьего ремонтного

**Таблица 3.** Параметры режима работы контактной сети в четном и нечетном направлениях (второй ремонтный режим)

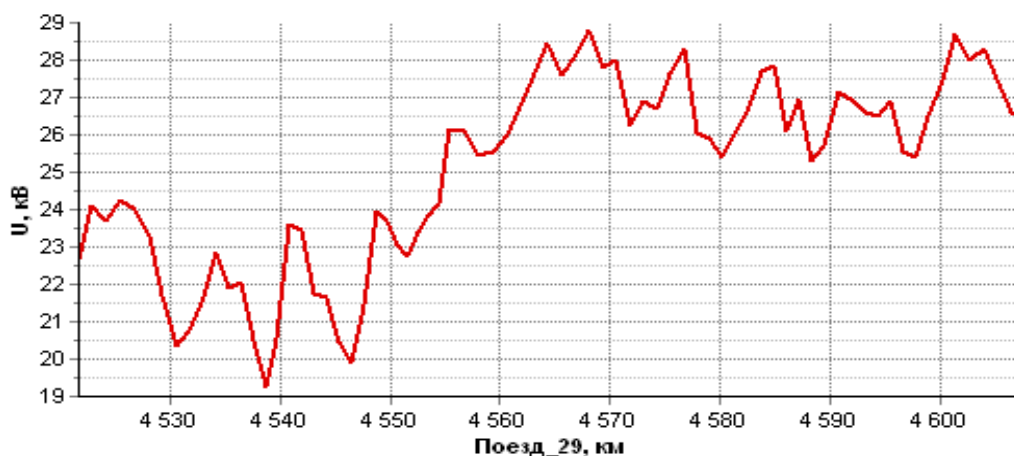
**Table 3.** Parameters of the contact network operation mode in even and odd directions (second repair mode)

Тип поезда Train type	Минимальное напряжение в контактной сети, кВ Minimum voltage in the contact network, kV		Максимальный ток проводов контактной сети, А The maximum current of the wires of the contact network, A	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Четный even	19,2	19,0	913,3	869,3
Четный even	17,95	17,9	915,2	881,4
Нечетный odd	19,5	20,1	395,7	405,8
Нечетный odd	18,7	19,7	401,5	437,5



**Рис. 3.** Модель реализации второго ремонтного режима

**Fig. 3.** Implementation model of the second repair mode



**Рис. 4.** График изменения напряжения четного поезда при втором ремонтном режиме

**Fig. 4.** Graph of the voltage change of an even train in the second repair mode

режима представлена на рис. 5.

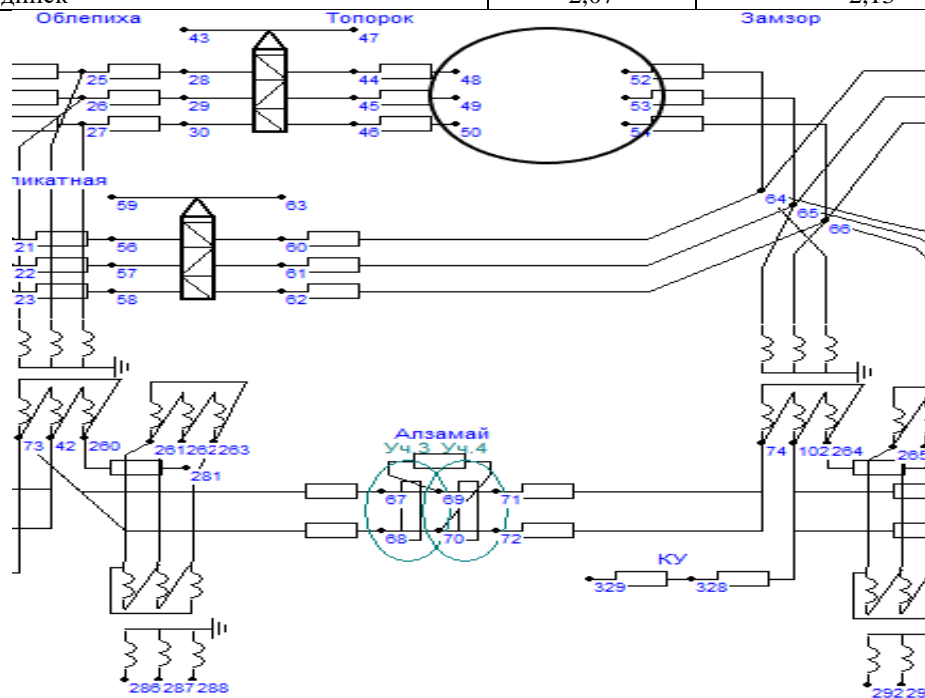
При третьем ремонтном режиме получен график уровня напряжения в КС для тяжеловесного поезда четного направления при использо-

вании АБТЦ-МШ (рис. 6). Данные о нескольких поездах представлены в табл. 5, а о загрузке силовых трансформаторов в третьем ремонтном режиме – в табл. 6.

**Таблица 4.** Коэффициенты загрузки трансформаторов в ремонтном режиме 2

**Table 4.** Load factors of transformers in repair mode 2

Наименование тяговой подстанции Name of traction substation	Коэффициент загрузки трансформаторов Load factor transformers	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Тайшет	1,17	1,18
Облепиха	1,15	1,19
Замзор	1,99	1,97
Ук	2,01	2,10
Нижеудинск	2,07	2,13



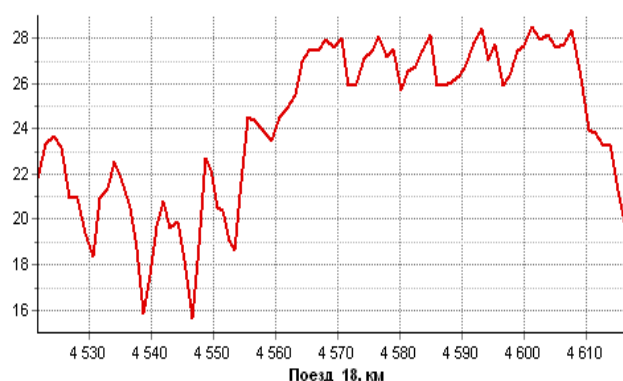
**Рис. 5.** Модель реализации третьего ремонтного режима

**Fig. 5.** Implementation model of the third repair mode

**Таблица 5.** Минимальное напряжение в контактной сети в четном и нечетном направлениях (ремонтный режим 3)

**Table 5.** Minimum voltage in the contact network in even and odd directions (repair mode 3)

Тип поезда Train type	Минимальное напряжение в контактной сети, кВ Minimum voltage in the contact network, kV		Максимальный ток проводов контактной сети, А The maximum current in the wires of the contact network, A	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ	АБТЦ-МШ	ВСЦ
	Четный even	15,8	16,5	905,3
Четный even	16,2	14,2	909,4	864,5
Нечетный odd	17,9	18,1	389,8	427,8
Нечетный odd	19,1	17,9	393,5	482,5



**Рис. 6.** График изменения напряжения четного поезда при третьем ремонтном режиме  
**Fig. 6.** Graph of the change in the voltage of an even train in the third repair mode

**Таблица 6.** Коэффициенты загрузки трансформаторов в третьем ремонтном режиме  
**Table 6.** Load factors of transformers in the third repair mode

Наименование тяговой подстанции Name of the traction substation	Коэффициент загрузки трансформаторов Load factors of transformers in the third repair mode	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Тайшет	1,23	1,21
Облепиха	1,17	1,19
Замзор	1,99	2,01
Ук	1,95	2,05
Нижеудинск	1,79	1,75

По результатам расчета параметров трех различных ремонтных режимов видно, что напряжение в КС не соответствует минимально допустимому значению 21 кВ.

Так, по системе АБТЦ-МШ при первом ремонтном режиме в четном направлении оно составило 11,0 кВ, в нечетном – 15,1 кВ; при втором ремонтном режиме в четном – 19,2 кВ, в нечетном – 18,7 кВ; при третьем ремонтном режиме в четном – 15,8 кВ, в нечетном – 17,9 кВ. При использовании системы ВСЦ при первом ремонтном режиме в четном направлении – 12,0 кВ, в нечетном – 15,4 кВ; при втором ремонтном режиме в четном – 17,9 кВ, в нечетном – 19,7 кВ; при третьем ремонтном режиме в четном – 14,2 кВ, в нечетном – 17,9 кВ.

Из результатов расчета видим, что ток контактной сети хотя и не превышает предельно допустимых значений, однако близится к ним. Аналогичная ситуация с током ВЛ в СВЭ.

Следовательно, можно сделать вывод, что необходимо провести усиление системы электроснабжения исследуемого участка.

### Предложения по техническому перевооружению систем электроснабжения

Для исследуемого в работе участка выполнено моделирование в ПВК Fazonord по от-

дельности таких способов усиления СВЭ и СТЭ, как:

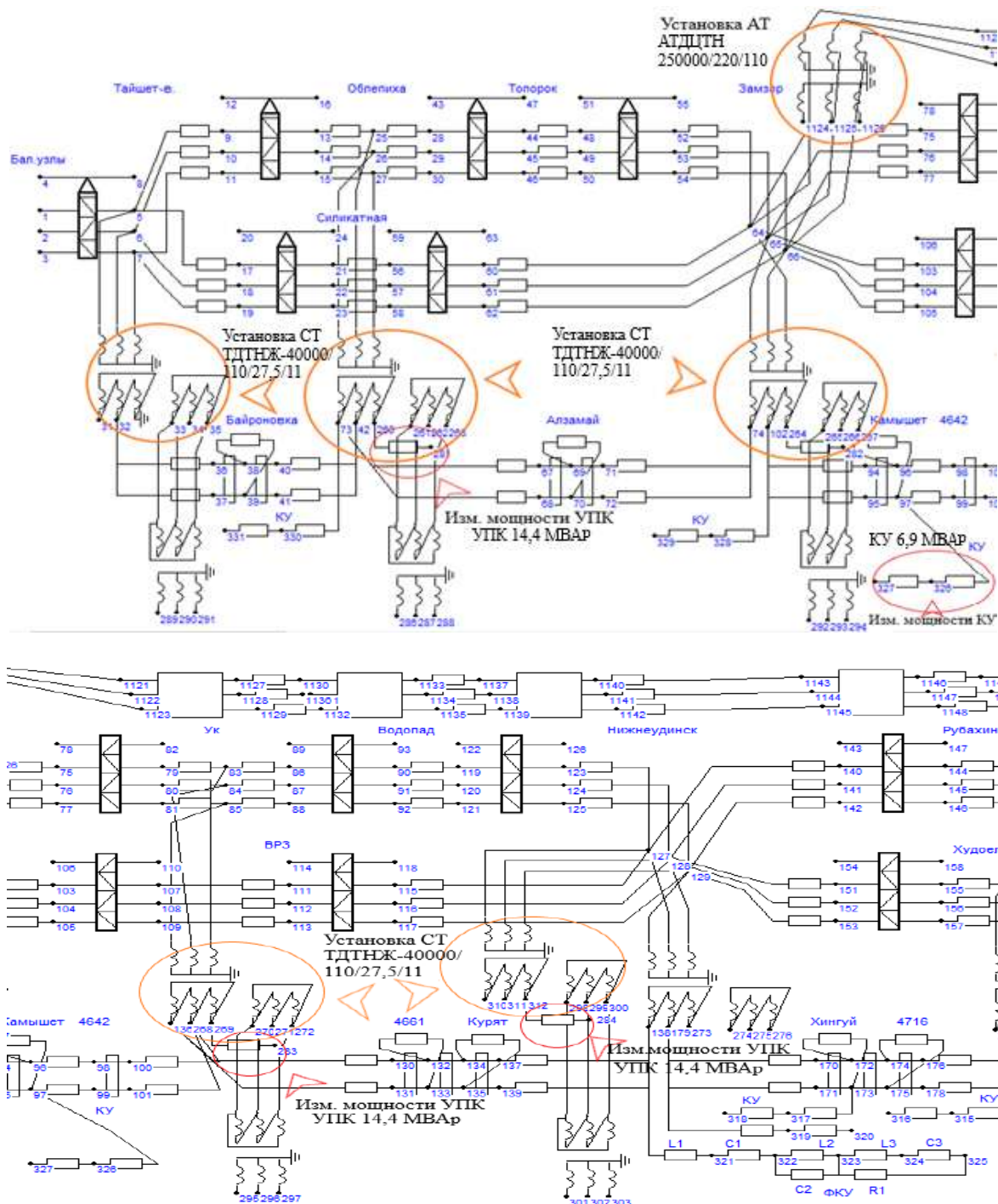
- установка автотрансформатора мощностью 250 МВА на ТП Замзор для связи с ЛЭП 220 кВ;
- установка батареи статических конденсаторов мощностью 25 МВАр на ТП Нижеудинск;
- установка дополнительного силового трансформатора (СТ) на ряде перегруженных ТП;
- монтаж усиливающего и экранирующего проводов в КС на лимитирующих участках;
- изменение мощности имеющихся устройств продольной компенсации (УПК);
- изменение мощности имеющихся устройств параллельной компенсации (КУ) [19–22].

Результаты моделирования показали, что ни один из рассмотренных способов усиления в отдельности не приводит нормируемые параметры СВЭ и СТЭ к допустимым значениям в ремонтных режимах. В дальнейшем выполнено исследование множества комбинированных вариантов усиления. Полученные при этом результаты позволили выявить оптимальный комбинированный вариант усиления СВЭ и СТЭ:

- установка АТ 220/110 кВ мощностью 250 МВА на ТП Замзор;

– монтаж дополнительного СТ на всех ТП участка;  
 – изменение мощности КУ на ПС Камышет с 5,8 до 6,9 МВАр;  
 – изменение мощности УПК на ТП Облепиха, Ук, Нижнеудинск до 14,4 МВАр.

Разработанная модель исследуемого участка с учетом предложенных средств усиления представлена на рис. 7. Результаты моделирования приведены в табл. 7–9. Полученные при использовании разных систем интервального регулирования результаты представлены на рис. 8–10.



**Рис. 7.** Модель исследуемого участка с учетом предложенных средств усиления  
**Fig. 7.** Model of the studied area, taking into account the proposed amplification means

**Таблица 7.** Сравнение напряжения и тока контактной сети при ремонтных режимах работы для систем АБТЦ-МШ и ВСЦ  
**Table 7.** Comparison of voltage and current of the contact network during repair modes of operation for systems ABTTS-MSH and VSTS

Ремонтный режим Repair mode	Тип поезда Train type	Минимальное напряжение в контактной сети, кВ Minimum voltage in the contact network, kV		Максимальный ток проводов контактной сети, А Maximum wire current in contact network	
		АБТЦ-МШ	ВСЦ	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Первый, 1st	Четный even	21,3	21,4	791,4	761,3
	Нечетный odd	21,4	21,8	395,1	352,7
Второй, 2nd	Четный even	21,5	22,0	753,2	732,8
	Нечетный odd	21,5	22,4	357,6	321,7
Третий, 3d	Четный even	21,8	21,9	687,5	631,2
	Нечетный odd	22,1	22,3	312,7	305,9

**Таблица 8.** Сравнение тока воздушной линии при различных ремонтных режимах работы для системы АБТЦ-МШ и ВСЦ

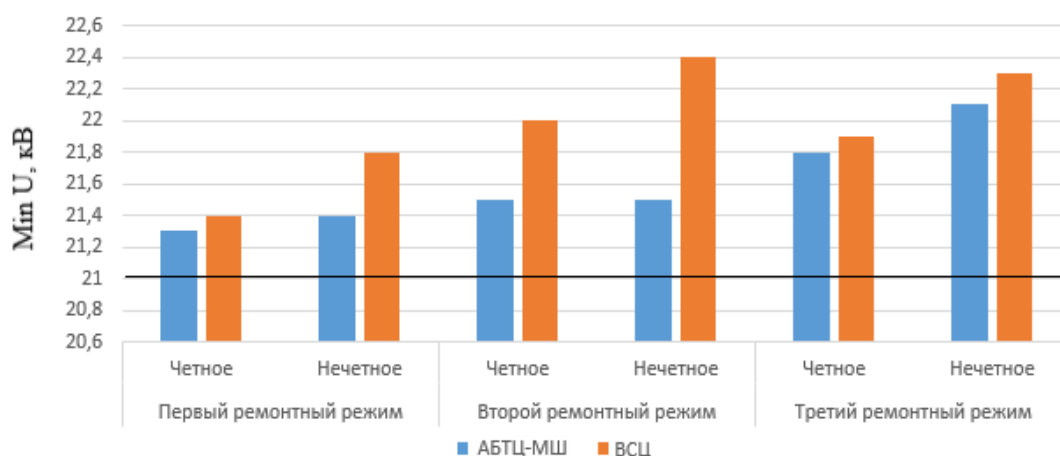
**Table 8.** Comparison of overhead line current at various repair operating modes for the system ABTTS-MSH and VSTS

Ремонтный режим Repair mode	Участок с максимальным током на воздушной линии Section with maximum overhead line current	Максимальный ток воздушной линии, А Maximum current in overhead line, A	
		АБТЦ-МШ	ВСЦ
Первый, 1st	Замзор – ВРЗ	481,8	475,4
Второй, 2nd	Тайшет – Облепиha	450,3	431,8
Третий, 3d	Ук – Водопад	434,1	412,8

**Таблица 9.** Коэффициенты загрузки трансформаторов при различных ремонтных режимах работы для системы АБТЦ-МШ и ВСЦ

**Table 9.** Transformer load factors for various repair modes of operation for the system ABTTS-MSH and VSTS

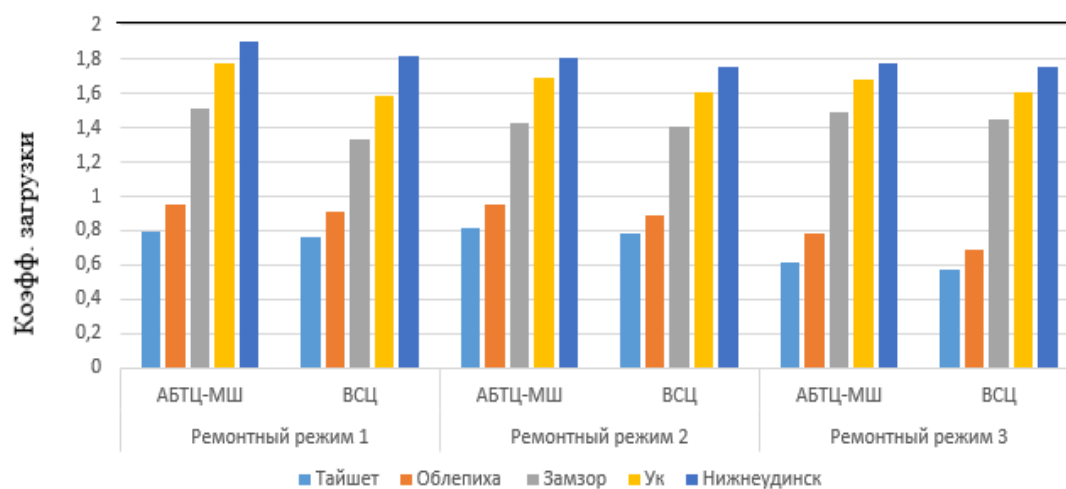
Тяговая подстанция Traction substation	Коэффициент загрузки силового трансформатора Power transformer load factor					
	Первый режим работы first operation mode		Второй режим работы second operation mode		Третий режим работы third operation mode	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ	АБТЦ-МШ	ВСЦ	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Тайшет	0,79	0,76	0,82	0,78	0,61	0,57
Облепиha	0,95	0,91	0,95	0,89	0,78	0,69
Замзор	1,51	1,33	1,43	1,41	1,49	1,45
Ук	1,78	1,59	1,69	1,61	1,68	1,61
Нижнеудинск	1,90	1,82	1,81	1,75	1,78	1,75



**Рис. 8.** Гистограмма напряжения в контактной сети при комбинированном способе усиления по системам АБТЦ-МШ и ВСЦ

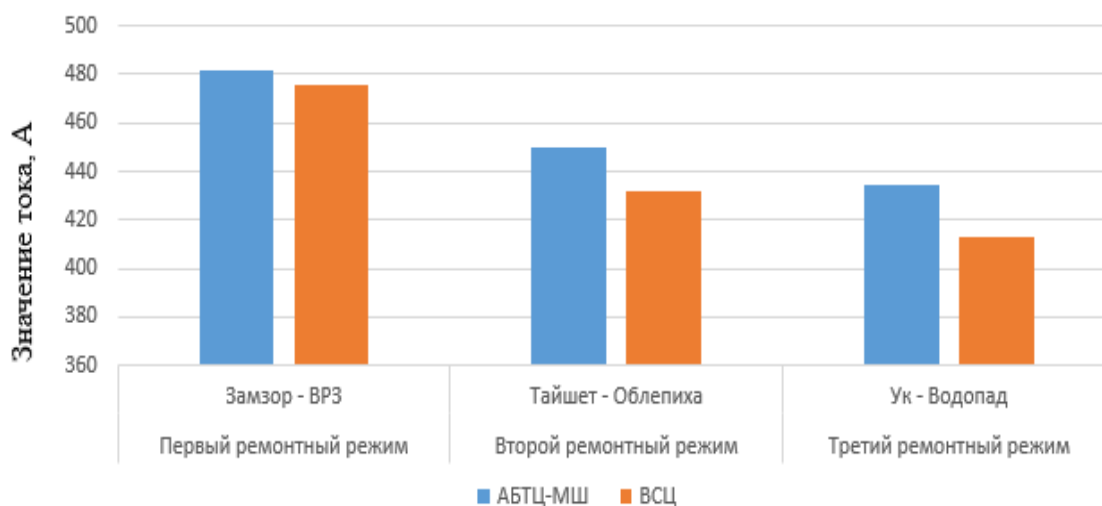
**Fig. 8.** Voltage histogram in the contact network with combined

method of amplification by systems ABTTS-MSH and VSTS



**Рис. 9.** Гистограмма изменения коэффициента загрузки силового трансформатора при комбинированном способе усиления по системам АБТЦ-МШ и ВСЦ

**Fig. 9.** Histogram of power transformer load factor change with the combined method of amplification by systems ABTTS-MSH and VSTS



**Рис. 10.** Гистограмма изменения тока воздушной линии при комбинированном способе усиления по системам АБТЦ-МШ и ВСЦ

**Fig. 10.** Histogram of overhead line current change with combined method of amplification by systems ABTTS-MSH and VSTS

В случае применения предложенного варианта усиления повышается напряжение в КС, тем самым увеличивается пропускная способность участка Юрты – Нижнеудинск. Напряжение на токоприемнике электровоза не менее 21 кВ и ток не более 880 А. Коэффициент загрузки трансформаторов не превышает значение, равное 2, во всех режимах. Ток ВЛ в СВЭ не превышает допустимого значения для ВЛ 110 кВ марки АС-185-510 А, для ВЛ 110 кВ марки АС-300-710 А.

Проведена сравнительная оценка пропускной способности поездов, движение которых организовано по системам АБТЦ-МШ и ВСЦ. По результатам расчета видно, что напряжение на токоприемнике по системе ВСЦ выше на 2,26 %, ток в КС ниже на 2,18 %, ток ВЛ ниже на 1,79 %, коэффициенты загрузки силового трансформатора на ТП ниже на 1,5–2 %. Для обеспечения требуемой пропускной способности устройств тягового электроснабжения

наиболее благоприятным является движение поездов, сформированное по системе ВСЦ.

Полученные результаты исследования ремонтных режимов подтвердили высокую эффективность использования разработанных предложений по техническому перевооружению системы электроснабжения участка Юрты – Нижнеудинск, поскольку ни один из контролируемых параметров режимов работы не выходит за пределы нормируемых значений.

### Заключение

В ходе проведенного исследования выявлено, что ремонтные режимы СВЭ на участке Юрты – Нижнеудинск оказывают значительное негативное влияние на пропускную способность СТЭ, поскольку уровень напряжения в КС на отдельных лимитирующих участках опускается до 11 кВ в наиболее тяжелом из ремонтных режимов, не позволяя осуществлять движение поездов. В связи с этим разработаны предложения по усилению СВЭ и СТЭ исследуемого участка. Анализ результатов моделирования различных комбинаций средств усиления позволил выявить оптимальный вариант

одновременного технического перевооружения СВЭ и СТЭ: установка АТ 220/110 кВ мощностью 250 МВА на ТП Замзор; монтаж дополнительного СТ на всех ТП участка; изменение мощности КУ на ПС Камышет с 5,8 до 6,9 МВАр; изменение мощности УПК на ТП Облепиха, Ук, Нижнеудинск до 14,4 МВАр.

Сравнение результатов применения двух систем интервального регулирования позволило сделать вывод о возможности реализации обеих систем на исследуемом участке, однако лучшие показатели для СТЭ обеспечивает использование ВСЦ.

Таким образом, благодаря внедрению предложенных средств усиления при росте объема грузоперевозок к 2030 г. на исследуемом участке будет обеспечена необходимая пропускная способность с учетом внедрения современных систем интервального регулирования, способствуя снижению потерь электроэнергии в системе электроснабжения, росту энергоэффективности работы железнодорожного транспорта [23–26] и развитию экономики страны в целом.

### Список литературы

1. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Степанов А.Д. Экспериментальная проверка математических моделей электрических систем, построенных на основе фазных координат // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2004. № 4(20). С. 152–157.
2. Potapov V.V., Suslov K.V., Kostina K.V. Theoretical Bases of Electrical Engineering. Irkutsk : Irkutsk National Research Technical University, 2020. 158 p.
3. Cherepanov A., Kutsyi A. Modeling of tractive power supply systems for heavy-tonnage trains operation // International Russian Automation Conference, RusAutoCon2018. С.8501734.
4. Швердин И.Н., Шаманов В.И., Трофимов Ю.А. Влияние тяжеловесных поездов на рельсовые цепи и АЛС // Автоматика, связь, информатика. 2004. № 8. С. 24.
5. Алексеев В.А., Пузина Е.Ю. Анализ повреждений измерительных трансформаторов на тяговых подстанциях ВСЖД // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2009. Т. 2. С. 4–9.
6. К повышению надежности устройств контактной сети / А.С. Есауленко, В.П. Ступицкий, В.А. Тихомиров и др. // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 200–205.
7. Влияние тяжеловесных поездов на рельсовые цепи и АЛСН / И.Н. Швердин, В.И. Шаманов, Ю.А. Трофимов и др. // Автоматика, связь, информатика. 2006. № 10. С. 16–19.
8. Reliability Analysis of Power Equipment of Traction Rolling Stock Within the Eastern Region / A.M. Khudonogov, I.A. Khudonogov, E.Y. Dulskiy et al // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region. 2020. Vol. 760. С. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012018.
9. Reduction of electrical energy losses of power transformer of 25 kV traction substations / N.P. Grigoriev, M.S. Klykov, V.A. Tikhomirov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 760. С. 012060. DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012060.
10. Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP & HOG Features / K. Firuzi, M. Vakilian, B. Toan Phung // Power Delivery IEEE Transactions on. 2019. Vol. 34. № 2. P. 542-550. DOI:10.1109/TPWRD.2018.2872820.
11. Обеспечение безопасности сложных технических систем (технологические подходы) / С.В. Елисеев, В.Е. Гозбенко, Н.М. Быкова и др. // Деп. в ВИНТИ РАН 17.04.2008, № 328-В2008.
12. Черепанов А.В., Куцый А.П., Есауленко А.С. Применение технологии виртуальной сцепки для поездов повышенной массы // Молодая наука Сибири. 2020. № 2 (8). С. 191–199.
13. Research on intelligent load transfer strategy based on distribution automation / C. Li, L. Zhang, J. Sheng et al. // China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Xi'an, 2016. P. 13. DOI:10.1088/1742-6596/1601/2/022026.
14. Yue Han, Qiang Gao, Xuebin Li. Research on the Application of Modern Power System Based on Automatic Control Technology // IEEE. 4th International Conference on Modeling and Simulation (MAS). 2015. DOI 10.1109/MAS.2015.16.



15. Пулятков А.В., Трофимов Ю.А., Скоробогатов М.Э. Комплексные решения по повышению устойчивости работы устройств автоматической локомотивной сигнализации на участках с электротягой переменного тока // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2015. Т. 1. С. 328–332.

16. Пулятков А.В., Скоробогатов М.Э., Халиманов Д.С. Исследование влияния электромагнитных помех на работу устройств авто-матической локомотивной сигнализации // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 191–198.

17. Создание аппаратно-программного комплекса увязки устройств полуавтоматической блокировки с электрической централизацией на международном стыке Забайкальск-Маньчжурия / А.Н. Сенотрусов, К.В. Менакер, М.В. Востриков и др. // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 186–191.

18. Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer / Zh. Xiaozhou, Ch. Minwu, X. Shaofeng et al. // IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Birmingham, 2016. P. 111–115. DOI 10.1109/ICIRT.2016.7588719.

19. Puzina E.Yu., Cherniga M.Yu., Khudonogov I.A. Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. С. 9271385. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271385.

20. Черепанов А.В., Куцкий А.П., Хисамов А.Р. Влияние режимов систем внешнего электроснабжения на пропускную способность системы тягового электроснабжения // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. Т. 2. С. 8–14.

21. Черепанов А.В., Куцкий А.П. Использование управляемых источников реактивной мощности в системах тягового электроснабжения // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 20. № 9 (116). С. 103–110.

22. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Чуро – Таксимо ВСЖД // Транспорт: наука, образование, производство : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону. 2016. Т. 2. С. 306–310.

23. Королева А.В., Аршинов С.А. К вопросу об энергосбережении на метрополитене // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2013. № 11(82). С. 283–288.

24. Воинова Д.В., Пузина Е.Ю. Повышение эффективности функционирования энергетических объектов муниципальной инфраструктуры // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2016. Т. 2. С. 170–175.

25. Захарова М.Ю., Пузина Е.Ю. Особенности проведения энергетического обследования нефтебазовых комплексов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2014. Т. 2. С. 235–240.

26. Сковородников А.А. Методы экономической оценки проектных решений по энергосбережению // Математическое моделирование и информационные технологии : материалы Семнадцатой Всерос. (девятой международной) науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2022». Иваново, 2022. Т. 6. С. 69.

## References

1. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Stepanov A.D. Eksperimental'naya proverka matematicheskikh modelei elektricheskikh sistem, postroennykh na osnove faznykh koordinat [Experimental verification of mathematical models of electrical systems based on phase coordinates]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2004, no. 4(20), pp. 152–157.

2. Potapov V.V., Suslov K.V., Kostina K.V. Theoretical Bases of Electrical Engineering. Irkutsk : Irkutsk National Research Technical University, 2020. 158 p.

3. Cherepanov A., Kutsyi A. Modeling of tractive power supply systems for heavy-tonnage trains operation. *International Russian Automation Conference, RusAutoCon2018*, 2018, P.8501734.

4. Sheverdin I.N., Shamanov V.I., Trofimov Yu.A. Vliyaniye tyazhelovesnykh poezdov na rel'sovye tsepi i ALS [Influence of heavy trains on track circuits and ALS]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], 2004, no. 8, p. 24.

5. Alekseenko V.A., Puzina E.Yu. Analiz povrezhdenii izmeritel'nykh transformatorov na tyagovykh podstantsiyakh VSZhD [Analysis of damage to measuring transformers at traction substations of the ESRW]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2009, vol. 2, pp. 4–9.

6. Esaulenko A.S., Stupitskii V.P., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. K povysheniyu nadezhnosti ustroystv kontaktnoi seti [To increase the reliability of contact network devices]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no. 2(12), pp. 200–205.

7. Sheverdin I.N., Shamanov V.I., Trofimov Yu.A., Pulytkov A.V. Vliyaniye tyazhelovesnykh poezdov na rel'sovye tsepi i ALSN [Influence of heavy trains on track circuits and ALSN]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], 2006, no. 10, pp. 16–19.

8. Khudonogov A.M., Khudonogov I.A., Dulskiy E.Y. et al. Reliability Analysis of Power Equipment of Traction Rolling Stock Within the Eastern Region. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region*, 2020, vol. 760, P. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012018.

9. Grigoriev N.P., Klykov M.S., Tikhomirov V.A. et al. Reduction of electrical energy losses of power transformer of 25 kV traction substations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 760, P. 012060. DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012060.

10. Firuzi K., Vakilian M., Toan Phung B. Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP &

- HOG Features. *Power Delivery IEEE Transactions on*, 2019, vol. 34, no. 2, pp. 542–550. DOI:10.1109/TPWRD.2018.2872820.
11. Eliseev S.V., Gozbenko V.E., Bykova N.M., Sobolev V.I., Upry' R.Yu., Logunov A.S., Nasnikov D.N., Dyachenko A.A., Permyakov M.A., Moscovskikh A.O., Ermochenko Yu.V., Kashtanov Yu.B., Uzunov V.G., Zasyadko A.A. Obespechenie bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem (tekhnologicheskoe podkhody) [Mine ensuring the safety of complex technical systems (technological approach)]. *Deponirovannaya rukopis'* [Deposited manuscript]. VINITI RAN, no. 328-V2008, 17.04.2008.
12. Cherepanov A.V., Kutsyi A.P., Esaulenko A.S. Primenenie tekhnologii virtual'noi stepki dlya poezdov povyshennoi massy [Application of virtual coupling technology for high-mass trains]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2020, no. 2(8), pp. 191–199.
13. Li C., Zhang L., Sheng J. et al. Research on intelligent load transfer strategy based on distribution automation. *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. Xi'an, 2016, P. 13. DOI:10.1088/1742-6596/1601/2/022026.
14. Yue Han, Qiang Gao, Xuebin Li. Research on the Application of Modern Power System Based on Automatic Control Technology. *IEEE. 4th International Conference on Modeling and Simulation (MAS)*, 2015. DOI 10.1109/MAS.2015.16.
15. Pul'tyakov A.V., Trofimov Yu.A., Skorobogatov M.E. Kompleksnye resheniya po povysheniyu ustoychivosti raboty ustroystv avtomaticheskoi lokomotivnoi signalizatsii na uchastkakh s elektroyagoi peremennogo toka [Integrated solutions to improve the stability of automatic locomotive signaling devices in areas with alternating current electric traction]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2015, vol. 1, pp. 328–332.
16. Pulyakov A.V., Skorobogatov M.E., Khalimanov D.S. Issledovanie vliyaniya elektromagnitnykh pomekh na rabotu ustroystv avtomaticheskoi lokomotivnoi signalizatsii [Research of the influence of electromagnetic interference on the operation of automatic locomotive signaling devices]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference «Education – Science – Production»]. Chita, 2018, vol. 1, pp. 191–198.
17. Senotrusov A.N., Menaker K.V., Vostrikov M.V., Ezhikov D.V. Sozdanie apparatno-programmnogo kompleksa uvyazki ustroystv poluavtomaticheskoi blokirovki s elektricheskoi tsentralizatsiei na mezhdunarodnom styke Zabaikal'sk-Man'chzhuriya [Creation of a hard ware and soft ware complex for linking semi-automatic locking devices with electrical centralization at the international junction of Zabaikalsk-Manchzhuriya]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference «Education – Science – Production»]. Chita, 2018, vol. 1, pp. 186–191.
18. Xiaozhou Zh., Minwu Ch., Shaofeng X. et al. Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer. *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*. Birmingham, 2016, pp. 111–115. DOI 10.1109/ICIRT.2016.7588719.
19. Puzina E.Yu., Cherniga M.Yu., Khudonogov I.A. Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020*. P. 9271385. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271385.
20. Cherepanov A.V., Kutsyi A.P., Khisamov A.R. Vliyanie rezhimov sistem vneshnego elektrosnabzheniya na propusknyuyu sposobnost' sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Influence of modes of external power supply systems on the capacity of the traction power supply system]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2019, vol. 2, pp. 8–14.
21. Cherepanov A.V., Kutsyi A. P. Ispol'zovanie upravlyaemykh istochnikov reaktivnoi moshchnosti v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya [The use of controlled reactive power sources in traction power supply systems]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2016, vol. 20, no. 9(116), pp. 103–110.
22. Puzina E.Yu. Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Churo – Taksimo VSZhD [Strengthening of the traction power supply system of the Churo-Taksimo section of the ESRW]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo»* [Proceedings of the International scientific and practical conference «Transport: science, education, production»]. Rostov-on-Don, 2016, vol. 2, pp. 306–310.
23. Koroleva A.V., Arshinov S.A. K voprosu ob energosberezhenii na metropolitene [On the issue of energy saving in the subway]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2013, no. 11(82), pp. 283–288.
24. Voinova D.V., Puzina E.Yu. Povysenie effektivnosti funktsionirovaniya energeticheskikh ob'ektov munitsipal'noi infrastruktury [Improving the efficiency of the functioning of energy facilities of the municipal infrastructure]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povysenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference with international participation «Increasing the efficiency of production and use of energy in Siberia»]. Irkutsk, 2016, vol. 2, pp. 170–175.
25. Zakharova M.Yu., Puzina E.Yu. Osobennosti provedeniya energeticheskogo obsledovaniya neftebazovykh kompleksov [Features of the energy survey of oil and gas complexes]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povysenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference with international participation «Increasing the efficiency of production and use of energy in Siberia»]. Irkutsk, 2014, vol. 2, pp. 235–240.
26. Skovorodnikov A.A. Metody ekonomicheskoi otsenki proektnykh reshenii po energosberezheniyu [Methods of economic evaluation of design solutions for energy conservation]. *Materialy Semnadsatoi Vserossiiskoi (devyatoi mezhdunarodnoi) nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh «Energiya-2022» (V 6 t)* [The seventeenth All-Russian (ninth international) scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists «Energy-2022» (in 6 vol.)]. Ivanovo, 2022, vol. 6, p. 69.

**Информация об авторах**

*Пузина Елена Юрьевна*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

**Information about the authors**

*Elena Yu. Puzina*, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ  
И ОБРАБОТКА**

**INFORMATION TECHNOLOGY, MANAGEMENT  
AND PROCESSING**

## Визуализация и анализ информации на основе компьютерного моделирования испытаний кабины карьерного гусеничного экскаватора на соответствие требованиям безопасности

В.С. Великанов<sup>1</sup>✉, Е.А. Ильина<sup>2</sup>, Ю.В. Кочержинская<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

На современном этапе развития мировой горнодобывающей промышленности определяющим фактором в достижении высоких технико-экономических показателей является комплексное решение теоретических и прикладных проблем горной сферы в контексте реализации основных подходов Индустрии 4.0. В статье решены вопросы системного анализа результатов компьютерного моделирования испытаний кабины карьерного гусеничного экскаватора на соответствие техническим требованиям, предъявляемым к кабине экскаватора. Цель исследования – выявить и наглядно продемонстрировать на разработанной модели места, наиболее подверженные деформации в конструкции кабины карьерного гусеничного экскаватора, с точки зрения эргономики и безопасности этой кабины как рабочего места. Одна из главных решаемых задач – локализация таких сегментов при возникновении динамических нагрузок. В программном комплексе Autodesk Inventor разработана 3D-модель кабины для виртуального моделирования с применением метода конечных элементов и расчетов напряженно-деформированного состояния несущих элементов металлоконструкции кабины экскаватора. При разработке трехмерной модели кабины карьерного экскаватора учтена дополнительная информация, а именно: жесткое соединение сиденья с кабиной, толщина листов обшивки каркаса, необходимая площадь остекления. С учетом этих составляющих было проведено моделирование нагружения кабины карьерного экскаватора и визуализированы результаты компьютерных расчетов. Анализ результатов этого этапа работы показал обоснованность принятых технических решений в совершенствовании конструкции кабины и позволил разработать рекомендации для внесения изменений в проектируемые изделия.

### Ключевые слова

добыча ископаемых, карьерный экскаватор, визуализация и анализ данных, виртуальная модель, эргономическое обеспечение

### Для цитирования

Великанов В.С. Визуализация и анализ информации на основе компьютерного моделирования испытаний кабины карьерного гусеничного экскаватора на соответствие требованиям безопасности / В.С. Великанов, Е.А. Ильина, Ю.В. Кочержинская // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3(75). – С. 196–206. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).196-206.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 13.07.2022 г.; поступила после рецензирования: 13.09.2022 г.; принята к публикации: 14.09.2022 г.

## Visualization and analysis of information based on computer simulation of the quarry tracked excavator cabin tests for the compliance with safety requirements

V.S. Velikanov<sup>1</sup>✉, E.A. Il'ina<sup>2</sup>, Yu.V. Kocherzhinskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, the Russian Federation

<sup>2</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, the Russian Federation

✉rizhik\_00@mail.ru

### Abstract

The article is related to the system analysis of the computer simulation results for the quarry crawler excavator cab's compliance tests with the technical requirements. The purpose of the research is to identify and demonstrate on the developed model the places that are most susceptible to deformation in the design of the quarry crawler excavator' cab, in terms of ergonomics and safety of it as a workplace. The main task is the localization of such segments when dynamic loads occur. The virtual dynamic model of the cabin is developed with the use of the finite element method and the calculations of the stress-strain state of the load-bearing excavator cabin elements with the Autodesk Inventor software. By developing a 3D model of the quarry excavator cab we took into account some additional information as: the rigid connection of the seat with the cab, the thickness of the sheeting of the frame, the required area of the glazing. According to this conditions, the simulation of the cab's loading was successful-

ly done and the results of computer calculations were visualized. The analysis of the results of this stage showed the validity of the accepted technical solutions to improve the design of the cabin and allowed to develop recommendations for changes in the designed products.

### Keywords

mining, mining excavator, computer simulation, data visualization and analysis, virtual model; ergonomic support

### For citation

Velikanov V.S., Il'ina E.A., Kocherzhinskaya Yu.V. Vizualizatsiya i analiz informatsii na osnove komp'yuternogo modelirovaniya ispytaniy kabiny kar'ernogo gusenichnogo ekskavatora na sootvetstvie trebovaniyam bezopasnosti [Visualization and analysis of information based on computer simulation of the quarry tracked excavator cabin' tests for the safety requirements accordance]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 196–206. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).196-206.

### Article info

Received: July 13, 2022; Revised: September 13, 2022; Accepted: September 14, 2022

### Введение

Горнодобывающая промышленность – это рабочий локомотив мировой экономики. Постоянная потребность в минерально-сырьевых ресурсах определяет интенсивное развитие техники и технологии их добычи. При открытой добыче полезных ископаемых выполняются взаимосвязанные основные и вспомогательные технологические операции, они, в конечном итоге, и определяют тип применяемой горной машины.

Экскавация горной массы и полезных ископаемых является одной из основных в цепочке основных производственных процессов горного производства, которая позволяет обеспечить занятость представителей всех последующих звеньев технологии переработки полезных ископаемых в конечный продукт. Экскаваторы используются для выемки и погрузки горных пород в транспортные средства, при перегрузке руды и вскрышных пород на внутрикарьерных перегрузочных пунктах, а также при железнодорожном способе отвалообразования. Экскаватор карьерный гусеничный (ЭКГ) – это основная горная машина, используемая на отечественных железорудных карьерах, а также при добыче цветных металлов и строительных материалов. Уровень технического оснащения современных карьерных экскаваторов достаточно высок, они оснащены современными системами электроприводов основных механизмов, информационно-диагностическими системами, комплексами регистрации и передачи данных в единую внутрикарьерную диспетчерскую сеть.

Установлено, что качество управления карьерным экскаватором определяется уровнем квалификации машиниста и эргономическим обеспечением его рабочего места и влияет на

эксплуатационную производительность. Обработка статистических данных по работе экскаваторов на железорудных месторождениях Южного Урала показала, что сохраняется тенденция к снижению эксплуатационной производительности и увеличению процента отказов основных рабочих механизмов. Это определяется следующими основными факторами: недостаточная проработка рабочего места с точки зрения эргономики, утомляемость машиниста, сверхнормативные нагрузки и др. [1–5].

В ряде работ [6–10] рассмотрена возможность использования основных подходов метода виртуальных прототипов (цифровых двойников) для создания современных образцов горной техники. В общем случае использование данного метода позволяет:

- уменьшить вероятность ошибок при проектировании;
- проводить эргономическую оценку прототипов машин на основе антропометрических критериев с использованием программных комплексов, что позволяет проводить сравнительную оценку кабин.

Оценка виртуального прототипа в основном проводится с помощью технических и антропотехнических критериев.

Технические критерии относятся только к оценке технических характеристик, они позволяют оценить такие особенности прототипа, как функциональность, прочность, надежность и др.

Антропотехнические критерии обусловлены наличием человека внутри машины или оборудования.

#### 1. Эргономические критерии:

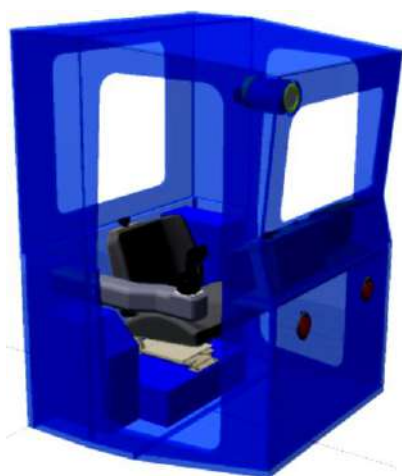
- диапазон конечностей – идентификация зон диапазона и зон комфорта, включая необходимость работы в неудобных позах тела;

- поле зрения;
- нагрузки в мышечно-скелетной системе

– способность воздействовать силами и крутящими моментами на конечности.

## 2. Критерии безопасности:

- защита от механических опасностей;
- критерий травмы головы;
- шум и вибрация;
- риск проскальзывания, спотыкания, падения;
- правильное освещение (отсутствие затененных областей, бликов и стробоскопического эффекта (рис. 1) [10].



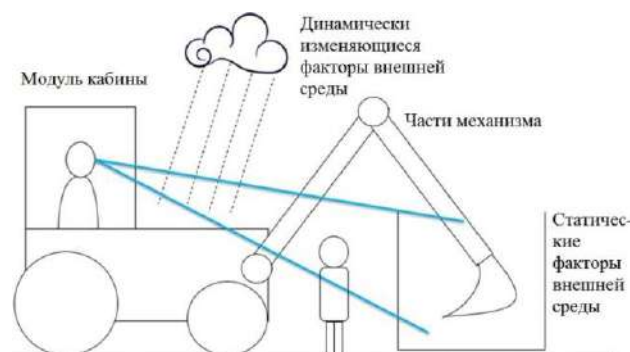
**Рис. 1.** Виртуальный прототип кабины подземного локомотива

**Fig. 1.** Virtual prototype of an underground locomotive cab

Цель исследования – выявить и наглядно продемонстрировать на разработанной модели места, наиболее подверженные деформации в конструкции кабины карьерного гусеничного экскаватора, с точки зрения эргономики и безопасности этой кабины как рабочего места.

Производительность оператора также может снизиться из-за неудобной позы, принятой для работы в условиях плохой видимости. Операторы постоянно принимают решения при работе с машиной на основе того, что могут видеть. Обзор может быть затруднен из-за рамы кабины или частей машины за пределами кабины (например, стрела или рукоять экскаватора), погодные и световые условия (туман, дождь), темнота, блики или иные объекты в непосредственной близости (другие технологические машины, сформировавшийся профиль выработки). Объекты, которыми манипулирует сама

горная машина, могут уменьшить видимость. Видимость – краеугольный камень эргономики рабочего места оператора горной машины. Он должен иметь возможность видеть цель в любое время, эргономика кабины должна способствовать эффективному выполнению задачи и безопасности рабочих операций. Основные факторы, снижающие видимость оператора горной машины, приведены на рис. 2 [11].



**Рис. 2.** Факторы, снижающие видимость оператора  
**Fig. 2.** Factors reducing visibility for operator

Развитию системных взглядов на вопросы эргономики горного оборудования посвящены труды по механизированной добыче полезных ископаемых, повышению безопасности горношахтного оборудования посредством промышленного дизайна, ориентированного на человека, защитным конструкциям для горных машин, компьютерному анализу параметров кабины машиниста транспортного средства, эргономической оценке кабины крана в металлургической промышленности, методам расчета высоты сиденья с акцентом на оптимальное положение человека на основе тригонометрических соотношений, оценке обзорных качеств кабин различных типов, анализу вибрации на сиденье машиниста [12–19].

## Материалы и методы

Важное требование при создании любой технологической машины, управляемой человеком – обеспечение безопасности ее конструкции в целом и безопасности рабочего места машиниста. В соответствии с требованиями, металлоконструкции кабины машиниста карьерного экскаватора должны иметь достаточную прочность и несущую способность по прилагаемым знакопеременным динамическим нагрузкам. Конструктивное исполнение кабины

карьерного экскаватора должно обеспечивать эффективное поглощение энергии удара с сохранением остаточного пространства внутри кабины для безопасности машиниста [5].

На основе обработки большого объема научно-технической литературы на этапе анализа кабин карьерных экскаваторов рассмотрено следующее:

- современные тенденции в дизайне кабин технологических машин;
- кабины зарубежных аналогов ЭКГ и их дизайнерские решения;
- компоновка приборов управления в соответствии с эргономическими требованиями и возможностью применения современных систем управления основными электроприводами;
- остекление кабины;
- применение системы отопления, вентиляции и кондиционирования;
- снижение вибрации;
- внутренняя облицовка;
- качество осветительных приборов (рис. 3).

Горные машины, эксплуатируемые на карьерах и разрезах, как правило, работают в сложных горно-геологических условиях и с учетом квалификации машинистов вероятность возникновения аварийных и внештатных ситуаций достаточно велика. Анализ условий эксплуатации карьерных экскаваторов и автосамосвалов, а также буровых станков показал, что наличие значительных уклонов и препятствий может приводить к опрокидыванию машин и завалам. В России основные требования к безопасности карьерных машин регламентируются стандартом ISO 3471 «Машины землеройные. Устройство защиты при опрокидывании. Технические требования и лабораторные испытания». Данный документ определяет технические требования к металлоконструкциям при опрокидывании машины, а также единообразие методов оценки

на соответствие этим требованиям.

К достижению высокого качества конструкции кабины карьерного экскаватора возможно прийти путем проведения расчетных и экспериментальных исследований с обязательным учетом требований безопасности и эргономических показателей, что приводит к снижению металлоемкости кабины и повышению эффективности эксплуатации карьерного экскаватора в целом.

Следовательно, проведение дальнейших исследований, направленных на создание и модернизацию кабин карьерной техники с учетом требований по эргономике, а также на оптимизацию параметров конструкции, актуально и востребовано.

Инновационный подход в сфере создания современных образцов карьерной техники заключается в разработке карьерных экскаваторов большой единичной мощности. Компоновочные решения предполагают использование в конструкции экскаватора модульной кабины. При создании кабин современных горностроительных машин применяют следующие принципы:

- каркас кабины должен обеспечивать эффективную защиту человека при опрокидывании машины – Roll Over Protective Structures (ROPSs);
- установка защитного навеса на раму кабины оператора (необходим для защиты человека при падении материала сверху) – Falling Object Protective Structures (FOPSs).

Первый уровень – конструкция кабины защищает от ударов с энергией, не превышающей 1,4 кДж, что соответствует ударам мелкокусковой породы или ручного инструмента.

Второй уровень – конструкция кабины обеспечивает защиту от ударов с энергией до 11,6 кДж и обрушения деревьев или средних кусков породы.



Рис. 3. Варианты модульных кабин карьерных экскаваторов  
Fig. 3. Variations of modular cabins of quarry excavators



Третий уровень – каркас кабины защищает от ударов крупных кусков материала с энергией 60 кДж – Rock Slide Protective Structures (RSPSS).

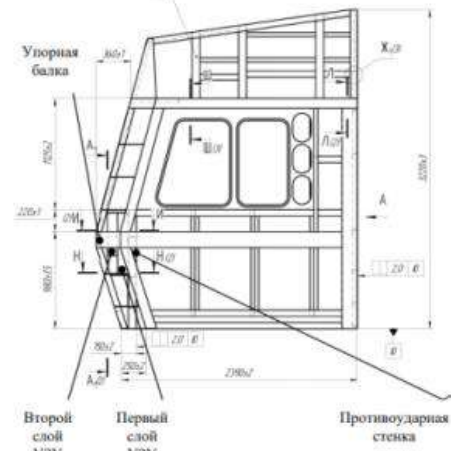
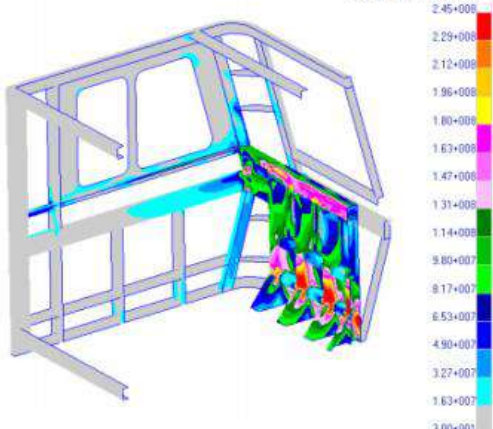

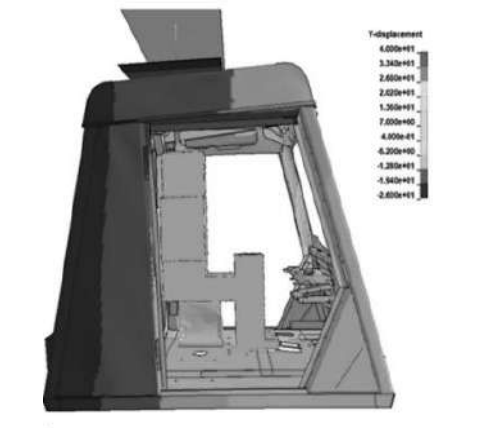
Четвертый уровень – конструкция каркаса кабины эквивалентная ROPS и отнесена к строительным экскаваторам – Tip Over Protective Structures (TOPS).

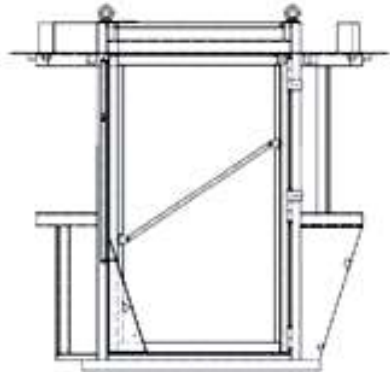
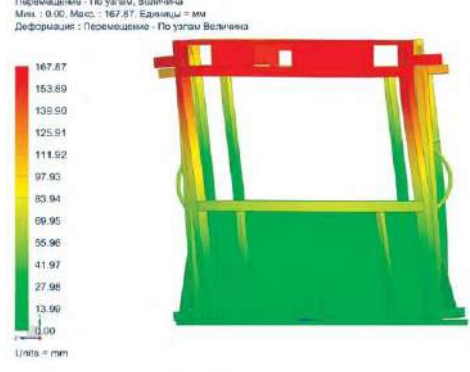
Стандарты ROPS и FOPS регламентируют проектирование и производство кабин операторов с использованием конструктивных элементов безопасности. Это является обязательным условием для сертификации горных машин на допуск к работе при открытой разработке полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях. Практика создания кабин карьерных экскаваторов заключается в

нахождении оптимального соотношения между требуемыми техническими показателями и экономической целесообразностью реализации проектных решений. В общем случае необходим определенный компромисс, обеспечивающийся минимизацией экономических затрат при сохранении нормируемых технических показателей конструкционной защиты кабины.

Необходимо отметить, что вопросы обеспечения безопасности кабин и моделирование их испытаний, реализованные в виде расчетных программных комплексов, достаточно подробно представлены в многочисленных научных публикациях. В таблице с учетом опыта ранее выполненных работ представлен краткий обзор по моделированию испытаний кабин различных машин [20–32].

Результаты моделирования кабин  
Results of cabin modeling

Оборудование / <i>Equipment</i>	Компьютерное моделирование / <i>Computer simulation</i>	Результаты нагружения кабины / <i>Cabinloading' results</i>
Локомотив / <i>Locomotive</i>		
Карьерный самосвал / <i>Dumper</i>		

Оборудование / Equipment	Компьютерное моделирование / Computer simulation	Результаты нагружения кабины / Cabinloading' results
Бульдозер / Bulldozer		 <p>Перемещение - По узлам, Величина Мин.: 0.00, Макс.: 167.67, Единицы: мм Деформация: Перемещение - По узлам, Величина Линия = мм</p>

Известно, что использование в научных исследованиях натурного эксперимента характеризуется высокими затратами времени и материальных средств, а кроме того, имеет ограничения по количеству исследуемых параметров.

### Компьютерное моделирование испытаний кабины и визуализация их результатов

Компьютерное моделирование позволяет снизить затраты времени и средств на разработку конструкций. Подобного рода задачи решаются с использованием метода конечных элементов.

В программном комплексе Autodesk Inventor разработана 3D-модель кабины для виртуального моделирования с применением метода конечных элементов и расчетов напряженно-деформированного состояния несущих элементов металлоконструкции кабины экскаватора.

Autodesk Inventor – система трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования (САПР), предназначенная для создания цифровых прототипов любых промышленных изделий. Возможности Autodesk Inventor обеспечивают полный цикл проектирования и создания конструкторской документации:

- моделирование (2D-/3D) с возможностью визуализации проектов;
- разработка различного рода изделий из листового материала с возможностью создания разверток;
- проектирование электрических систем;
- проекты для литья пластика;
- динамическое моделирование;

- параметрический расчет напряженно-деформированного состояния деталей и сборок;
- актуальное обновление конструкторской документации [19].

Исходными данными для моделирования приняты геометрические размеры модульной кабины экскаватора, нагрузки, действующие на каркас кабины при ее нагружении, марка материала и его свойства, масса кабины с возможностью ее варьирования от 500 до 2 500 кг. При разработке трехмерной модели кабины карьерного экскаватора нами учтена дополнительная информация, а именно: жесткое соединение сиденья с кабиной, толщина листов обшивки каркаса, необходимая площадь остекления [5]. Специфика компоновки карьерного экскаватора предполагает использование специальной площадки для крепления модуля кабины, чтобы 3D-модель кабины соответствовала не только всем заданным пропорциям и геометрическим размерам, но и была оптимальной по пространственным характеристикам, максимально удобной и безопасной по эксплуатационным свойствам. Кроме того, созданный виртуальный прототип кабины карьерного экскаватора дает возможность моделировать обзорность с рабочего места машиниста, производить оценку визуальной информативности зоны карьерного забоя и рабочего пространства машиниста. Реализация возможностей программного комплекса Autodesk Inventor позволит также осуществить и эргономическую оценку кабины на соответствие спецификации требованиям заказчика.

Каркас кабины экскаватора должен обеспечить защиту машиниста от возможного падения крупных кусков пород сверху (нависающих «козырьков»), глыб и отдельных крупных валу-

нов), защиту машиниста при опрокидывании экскаватора с карьерного уступа и др. (рис. 4). К каркасу кабины последовательно прикладывают боковую и вертикальную нагрузки. Рабочие моменты моделирования испытаний приведены на рис. 5.

К каркасу кабины последовательно прикладывают боковую и вертикальную нагрузки. Рабочие моменты моделирования испытаний приведены на рис. 5.

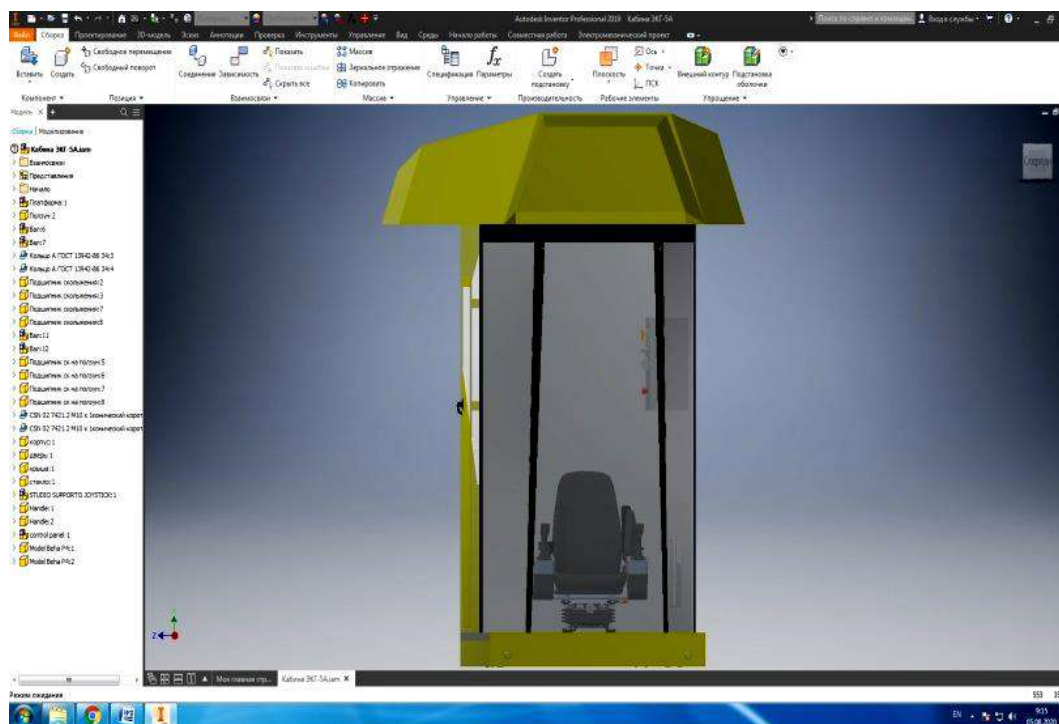
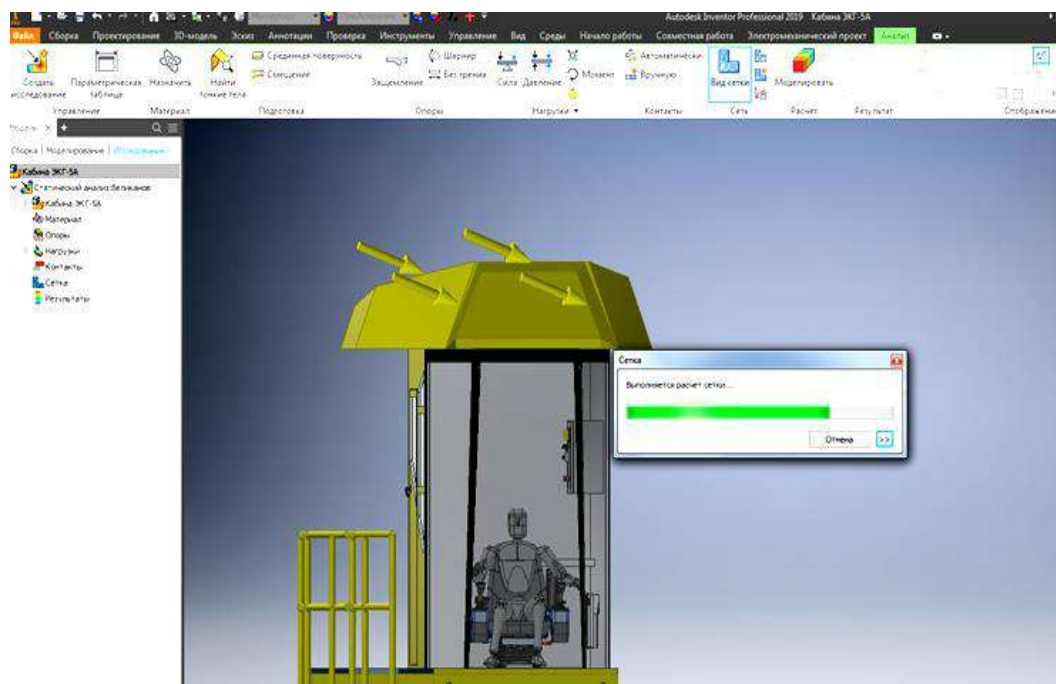
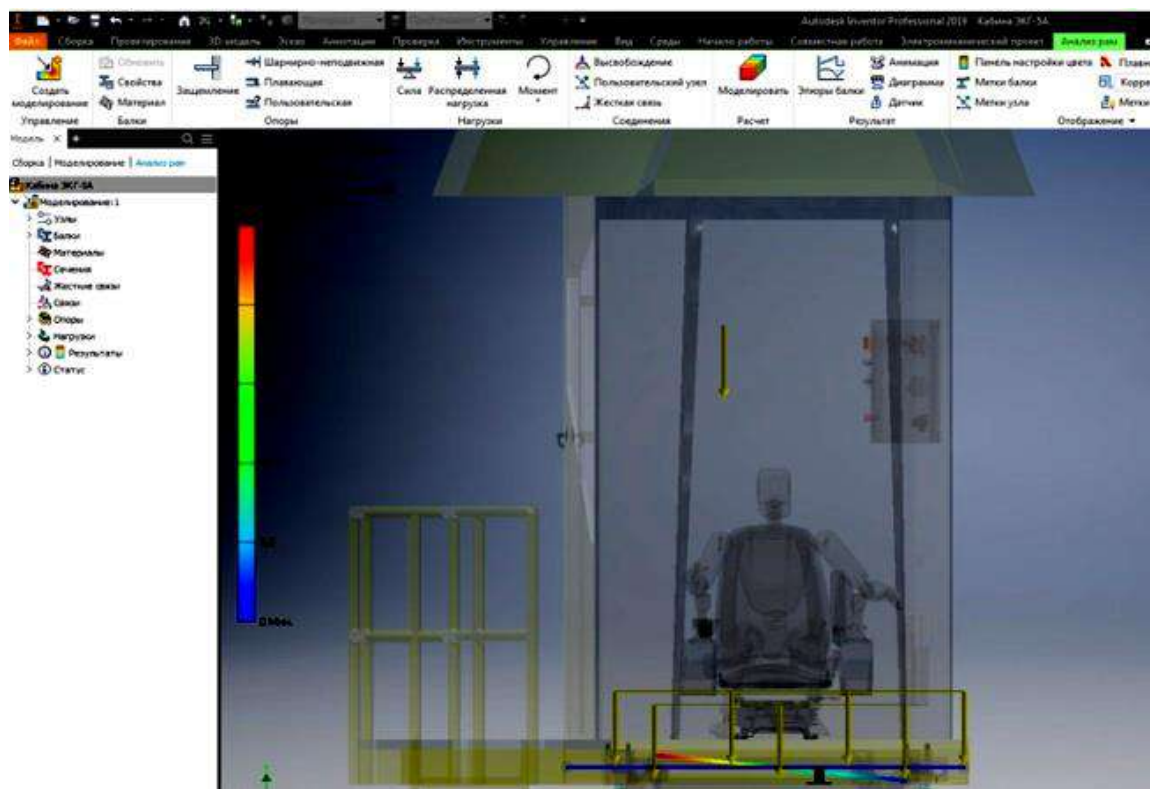


Рис.4. 3D-визуализация модели кабины экскаватора, разработанная в соответствии RSPSs

Fig. 4. 3D-visualization of excavator cabin model developed in accordance with RSPSs



а



б

Рис. 5. Визуализация данных испытаний кабины карьерного экскаватора при приложении:  
 а – боковой нагрузки; б – вертикальной нагрузки

Fig. 5. Visualization of testing data for quarry excavator cabin under application of  
 a – lateral loading; b – vertical loading

### Заключение

Проведено моделирование кабины карьерного экскаватора с использованием современного пакета Autodesk Inventor, предназначенного для расчета и компьютерного моделирования условий нагружения, в соответствии с действующими нормативными документами. Расчетная модель визуализирована в формате 3D.

С целью повышения прочности кабины проведены исследования при различных видах нагружения по оценке влияния отдельных си-

ловых элементов на работоспособность конструкции.

Анализ результатов моделирования показал, что созданная конструкция кабины удовлетворяет мировым требованиям, предъявляемым к кабинам карьерных экскаваторов.

По результатам проведенных исследований подана заявка на полезную модель конструкции кабины машиниста карьерного экскаватора с повышенной безопасностью и защитой от ударов.

### Список литературы

1. Тарасов М.А. Моделирование параметров функционирования выемочной машины с вибрационным воздействием на горные породы // Устойчивое развитие горных территорий. 2019. Т. 11. № 1 (39). С. 85–97.
2. Седнев В.А., Копнышев С.Л., Седнев А.В. Исследование этапов процесса и обоснование математической модели расширения сферической полости в грунтах и горных породах // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 2 (44). С. 302–314.
3. Моделирование и оптимизация режимов работы горных машин с использованием среды Matlab / В.С. Великанов, И.Г. Усов, А.А. Абдрахманов и др. // Горный журнал. 2017. № 12. С. 78–81.
4. Осинцев Н.А. Управления безопасностью производства на рабочих местах с применением аппарата теории нечетких множеств // Вестн. Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2008. № 4 (24). С. 83–85.
5. Velikanov V.S., Kozur A.V., Dyorina N.V. Engineering implementation of view objectives in mine excavator design // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 1592–1596.
6. Aromaa S., K. Vaananen Suitability of virtual prototypes to support human factors/ergonomics evaluation during the design // Applied ergonomics. 2016. Vol. 56. Pp. 11–18.

7. Chakraborty P.R., Bise C.J. A virtual-reality-based model for task-training of equipment operators in the mining industry // *Mineral resources engineering*. 2000. Vol. 9, Ed. 4. Pp. 437–449.
8. Du Y., Dorneich M.C., Steward B. Virtual operator modeling method for excavator trenching // *Automation in construction*. 2016. Vol. 70. Pp. 14–25.
9. Mallam S.C., Lundh M., MacKinnon S.N. Evaluating a digital ship design tool prototype: Designers' perceptions of novel ergonomics software // *Applied ergonomics*. 2016. Vol. 59. Part A. Pp. 19–26.
10. Tokarczyk J. Method for virtual prototyping of cabins of mining machines operators // *Archives of mining sciences*. 2015. Vol. 60, Ed.1. Pp. 329–340.
11. Aromaa S., Goriachev V., Kymäläinen T. Virtual prototyping in the design of see-through features in mobile machinery // *Virtual Reality*. 2020. Vol. 24, Ed. 1. Pp. 23–37. DOI 10.1007/s10055-019-00384-y.
12. A new method for calculating saddle seat height with an emphasis on optimal posture based on trigonometric relations / H. Babaei, M. Razeghi, A. Choobineh et al. // *International journal of occupational safety and ergonomics*. 2016. Vol. 22, Ed. 4. Pp. 565–571.
13. Balaji K., Alphin M.S. Computer-aided human factors analysis of the industrial vehicle driver cabin to improve occupational health // *International journal of injury control and safety promotion*. 2014. Vol. 23, Ed. 3. Pp. 240–248.
14. Evaluation of operator visibility in three different cabins type Far-East combine harvesters / D.H. Lee, Y.J. Kim, C.H. Choi et al. // *International journal of agricultural and biological engineering*. 2016. Vol. 9, Ed. 4. Pp. 33–44.
15. Horberry T., Burgess-Limerick R., Cooke T., Steiner L. Improving mining equipment safety through human-centered design // *Ergonomics in design: Quarterly of human factors applications*. 2016. Vol. 24, Ed. 3. Pp. 29–34.
16. Karlinski J., Rusinski E., Smolnicki T. Protective structures for construction and mining machine operators // *Automation in construction*. 2008. Vol. 17, Ed. 3. Pp. 232–244.
17. Kushwaha D.K., Kane P.V. Ergonomic assessment and workstation design of shipping crane cabin in steel industry // *International journal of industrial ergonomics*. 2015. Vol. 52. Pp. 29–39.
18. Schutte P.C., Smith J.R. Practical ergonomics in mechanized mining // *Journal of the South African institute of mining and metallurgy*. 2002. Vol. 102, Ed.3. Pp. 145–149.
19. Vibration analysis on driver's seat of agricultural tractors during tillage tests / T. Gialamas, I. Gravalos, D. Kateris et al. // *Spanish journal of agricultural research*. 2016. Vol. 14, Ed. 4: e0210. DOI 10.5424/sjar/2016144-9664.
20. Виртуальные испытания – инструмент оценки безопасности конструкций АТС / М.С. Высоцкий, Е.А. Багаев, С.С. Баулин и др. // *Автомобильная промышленность*. 2011. № 2. С. 38–40.
21. Вьюшина М.Н., Жура В.П., Кривенко А.Е. Математическая модель человека в системе «Оператор – горная машина» // *Горн. информ.-аналит. бюл.* 1996. № 4. С. 91–93.
22. Журавлев А.В. Разработка математической модели несущей системы кабины с использованием современных систем инженерного анализа // *Международный научный журнал*. 2012. № 1. С. 89–91.
23. Журавлёв А.В., Козловская М.А. Результаты экспериментальных исследований несущего каркаса кабины опытного образца малогабаритного транспортного средства // *Международ. техн.-экон. журнал*. 2011. № 2. С. 128–133.
24. Зузов В.Н., Шабан Б. Совершенствование кабин грузовых автомобилей на стадии проектирования для удовлетворения требованиям пассивной безопасности // *Инженерный журнал: наука и инновации : электрон. журн.* 2013. № 12. URL: <http://engjournal.ru/articles/1130/1130.pdf> (Дата обращения 4.07.2022).
25. Красюков Н.Ф., Оганьян Э.С., Ноздрачева В.А. Моделирование нагруженности конструкции кабины машиниста при столкновении локомотива с препятствием // *Тяжелое машиностроение*. 2006. № 8. С. 34–35.
26. Красюков Н.Ф., Протопопов А.Л., Шашкова Е.В. Численное моделирование эксплуатационной нагруженности экипажных частей // *Вестн. науч.-исслед. и конструктор.-технолог. ин-та подвижного состава*. 2012. № 4. С. 104–113.
27. Методы определения ресурса и циклической прочности конструкций экипажной части локомотивов / Н.А. Махутов, В.А. Гапанович, В.С. Коссов и др. // *Транспорт: наука, техника, управление*. 2016. № 10. С. 3–12.
28. Дзоценидзе Т.Д., Козловская М.А., Загарин Д.А. Новый технический облик автомобилей и тракторов как способ преодоления кризисных явлений в отечественном машиностроении // *Автомобильная промышленность*. 2020. № 10. С. 13–18.
29. Результаты испытаний гусеничного трактора ВТ-155Д с новой верхней надстройкой / Т.Д. Дзоценидзе, О.В. Ульянов, М.А. Козловская // *Тракторы и сельхозмашины*. 2011. № 12. С. 7–9.
30. Шмелев А.В., Лисовский Э.В., Короткий В.С. Основы методики виртуального моделирования испытаний кабин грузовых автомобилей по требованиям пассивной безопасности // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2015. № 3 (32). С. 64–72.
31. Dzotsenidze T.D., Zagarin D.A., Kozlovskaya M.A. Use of profiled tubes to create three-dimensional frame-and-panel systems for tractors and automobiles // *Metallurgist*. 2014. Vol. 58, № 7-8. Pp. 717–723.
32. Mirzaamiri R., Esfahanian M., Ziaei-Rad S. Crash Test Simulation and Structure Improvement of IKCO 2624 Truck According to ECE-R29 Regulation // *International Journal of Automotive Engineering*. 2012. Vol. 2. № 3. Pp. 180–192. URL: <http://ijae.iust.ac.ir/article-1-145-en.pdf> (дата обращения 18.06.2022).

## References

1. Tarasov M.A. Modelirovanie parametrov funktsionirovaniya vyemochnoi mashiny s vibratsionnym vozdeistviem na gornye porody [Modeling of operating parameters of mining machines with vibration on the rocks]. *Ustoichivoe razvitiye gornykh territorii* [Sustainable development of mountain territories], 2019, vol. 11, no. 1(39), pp. 85–97.

2. Sednev V.A., Kopnyshev S.L., Sednev A.V. Issledovanie etapov protsessa i obosnovanie matematicheskoi modeli rasshirenii sfericheskoi polosti v gruntakh i gornyykh porodakh [Research of process stages and justification of mathematical model of spherical cavity expansion in soils and rocks]. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii* [Sustainable development of mountain territories], 2020, vol. 12, no. 2 (44), pp. 302–314.
3. Velikanov V.S., Usov I.G., Abdrakhmanov A.A., Usov I.I. Modelirovanie i optimizatsiya rezhimov raboty gornyykh mashin s ispolzovaniem sredy Matlab [Modeling and optimization of mining machine operation modes with MATLAB]. *Gornyi Zhurnal* [Mining magazine], 2017, no. 12, pp. 78–81.
4. Osintsev N.A. Upravleniia bezopasnostiu proizvodstva na rabochikh mestakh s primeneniem apparata teorii nechetkikh mnozhestv [Production safety management at workplaces using the apparatus of the theory of fuzzy sets]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov], 2008, no. 4 (24), pp. 83–85.
5. Velikanov V.S., Kozyr A.V., Dyorina N.V. Engineering implementation of view objectives in mine excavator design. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1592–1596.
6. Aromaa S., K. Vaananen Suitability of virtual prototypes to support human factors/ergonomics evaluation during the design. *Applied ergonomics*, 2016, vol. 56, pp. 11–18.
7. Chakraborty P.R., Bise C.J. A virtual-reality-based model for task-training of equipment operators in the mining industry. *Mineral resources engineering*, 2000, vol. 9, ed. 4, pp. 437–449.
8. Du Y., Dorneich M.C., Steward B. Virtual operator modeling method for excavator trenching. *Automation in construction*, 2016, vol. 70, pp. 14–25.
9. Mallam S.C., Lundh M., MacKinnon S.N. Evaluating a digital ship design tool prototype: Designers' perceptions of novel ergonomics software. *Applied ergonomics*, 2016, vol. 59, part A, pp. 19–26.
10. Tokarczyk J. Method for virtual prototyping of cabins of mining machines operators. *Archives of mining sciences*, 2015, vol. 60, ed.1, pp. 329–340.
11. Aromaa S., Goriachev V., Kymäläinen T. Virtual prototyping in the design of see-through features in mobile machinery. *Virtual Reality*, 2020, vol. 24, ed. 1, pp. 23–37. DOI 10.1007/s10055-019-00384-y.
12. Babaei H., Razeghi M., Choobineh A. et al. A new method for calculating saddle seat height with an emphasis on optimal posture based on trigonometric relations. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 2016, vol. 22, ed. 4, pp. 565–571.
13. Balaji K., Alphin M.S. Computer-aided human factors analysis of the industrial vehicle driver cabin to improve occupational health. *International journal of injury control and safety promotion*, 2014, vol. 23, ed. 3, pp. 240–248.
14. Lee D.H., Kim Y.J., Choi C.H. et al. Evaluation of operator visibility in three different cabins type Far-East combine harvesters. *International journal of agricultural and biological engineering*, 2016, vol. 9, ed. 4, pp. 33–44.
15. Horberry T., Burgess-Limerick R., Cooke T., Steiner L. Improving mining equipment safety through human-centered design. *Ergonomics in design: Quarterly of human factors applications*, 2016, vol. 24, ed. 3, pp. 29–34.
16. Karlinski J., Rusinski E., Smolnicki T. Protective structures for construction and mining machine operators. *Automation in construction*, 2008, vol. 17, ed. 3, pp. 232–244.
17. Kushwaha D.K., Kane P.V. Ergonomic assessment and workstation design of shipping crane cabin in steel industry. *International journal of industrial ergonomics*, 2015, vol. 52, pp. 29–39.
18. Schutte P.C., Smith J.R. Practical ergonomics in mechanized mining. *Journal of the South African institute of mining and metallurgy*, 2002, vol. 102, ed. 3, pp. 145–149.
19. Gialamas T., Gravalos I., Kateris D. et al. Vibration analysis on driver's seat of agricultural tractors during tillage tests. *Spanish journal of agricultural research*, 2016, vol. 14, ed. 4: e0210. DOI 10.5424/sjar/2016144-9664.
20. Vysotskii M.S., Bagaev E.A., Baulin S.S., Kovenya A.S., Kutsevolov V.A. Virtualnye ispytaniia – instrument otsenki bezopasnosti konstruksii ATS [Virtual Testing – Safety Assessment Tool for Vehicle Structures]. *Avtomobil'naya promyshlennost'* [Automotive industry], 2011, no. 2, pp. 38–40.
21. V'yushina M.N., Zhura V.P., Krivenko A.E. Matematicheskaiia model cheloveka v sisteme «Operator – gornaia mashina» [Mathematical model of a person in the "Operator – mining machine" system]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], 1996, no. 4, pp. 91–93.
22. Zhuravlev A.V. Razrabotka matematicheskoi modeli nesushchei sistemy kabiny s ispolzovaniem sovremennykh sistem inzhenernogo analiza [Mathematical model' of the carrier system of the cabin development using modern systems of engineering analysis]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal* [International scientific journal], 2012, no. 1, pp. 89–91.
23. Zhuravlev A.V., Kozlovskaya M.A. Rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy nesushchego karkasa kabiny opytного obraztsa malogabaritnogo transportnogo sredstva [The results of experimental studies of the cabin's supporting frame of the prototype of a small-sized vehicle]. *Mezhdunarodnyi tekhniko-ekonomicheskii zhurnal* [International technical and economic journal], 2011, no. 2, pp. 128–133.
24. Zuzov V.N., Shaban B. Sovershenstvovanie kabin gruzovykh avtomobilei na stadii proektirovaniia dlia udovletvoreniia trebovaniyam passivnoi bezopasnosti [Truck cabins improvement at the design stage to satisfy passive safety requirements]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 12. Available at: URL: <http://engjournal.ru/articles/1130/1130.pdf> (Accessed July 4, 2022).
25. Krasnyukov N.F., Ogan'yan E.S., Nozdracheva V.A. Modelirovanie nagruzhenosti konstruksii kabiny mashinista pri stolknoveniin lokomotiva s prepiatstviem [Modeling the loading of the driver's cabin structure when a locomotive collides with an obstacle]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy engineering], 2006, no. 8, pp. 34–35.
26. Krasnyukov N.F., Protopopov A.L., Shashkova E.V. Chislennoe modelirovanie ekspluatatsionnoi nagruzhenosti ekipazhnykh chastei [Numerical modeling of the operational loading of the carriage parts]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo i kon-*

*struktorsko-tehnologicheskogo instituta podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Research and Design Technological Institute of Rolling Stock], 2012, vol. 94, pp. 104–113.

27. Makhutov N.A., Gapanovich V.A., Kossov V.S., Ogan'yan E.S., Krasyukov N.F., Volokhov G.M. Metody opredeleniia resursa i tsiklicheskoï prochnosti konstruktivnoï ekipazhnoi chasti lokomotivov [Methods for determining the resource and cyclic strength of structures of the locomotives' undercarriage]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, equipment, management], 2016, no. 10, pp. 3–12.

28. Dzotsenidze T.D., Kozlovskaya M.A., Zagarin D.A. Novyi tekhnicheskii oblik avtomobilei i traktorov kak sposob preodoleniya krizisnykh yavlenii v otechestvennom mashinostroenii [The new technical appearance of cars and tractors as a way to overcome the crisis in the native mechanical engineering sphere]. *Avtomobil'naya promyshlennost'* [Automotive industry], 2020, no. 10, pp. 13–18.

29. Dzotsenidze T.D., Ul'yanov O.V., Kozlovskaya M.A., Il'in V.M. Rezultaty ispytaniï gusenichnogo traktora VT-155D s novoi verkhnei nadstroikoi [Test results of the VT-155D tracked tractor with a new upper superstructure]. *Traktory i sel'khoz-mashiny* [Tractors and agricultural machinery], 2011, no. 12, pp. 7–9.

30. Shmelev A.V., Lisovskii E.V., Korotkii V.S. Osnovy metodiki virtualnogo modelirovaniya ispytaniï kabin gruzovykh avtomobilei po trebovaniyam passivnoi bezopasnosti [Fundamentals of the methodology for virtual simulation of trucks' testing cabins according to passive safety requirements]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2015, no. 3(32), pp. 64–72.

31. Dzotsenidze T.D., Zagarin D.A., Kozlovskaya M.A. Use of profiled tubes to create three-dimensional frame-and-panel systems for tractors and automobiles. *Metallurgist*, 2014, vol. 58, no. 7-8, pp. 717–723.

32. Mirzaamiri R., Esfahanian M., Ziaei-Rad S. Crash Test Simulation and Structure Improvement of IKCO 2624 Truck According to ECE-R29 Regulation. *International Journal of Automotive Engineering*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 180–192. URL: <http://ijae.iust.ac.ir/article-1-145-en.pdf> (Accessed June 18, 2022).

### Информация об авторах

**Великанов Владимир Семенович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; e-mail: rzhik\_00@mail.ru.

**Ильина Елена Александровна**, кандидат педагогических наук, доцент кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, e-mail: dar\_nas@mail.ru.

**Кочержинская Юлия Витальевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, e-mail: y.kocherzhinskaya@mail.ru.

### Information about the authors

**Vladimir S. Velikanov**, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Lifting and transport machines and robots, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg; e-mail: rzhik\_00@mail.ru.

**Elena A. Ilina**, PhD in Educational Science, Associate Professor of Department of Computer Science and Programming, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk; e-mail: dar\_nas@mail.ru.

**Yulia V. Kocherzhinskaya**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Department of Computer Science and Programming, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk; e-mail: y.kocherzhinskaya@mail.ru.



## АРШИНСКИЙ ЛЕОНИД ВАДИМОВИЧ

Доктор технических наук, доцент

Аршинский Леонид Вадимович, родился в г. Иркутске в 1957 г. Здесь же окончил среднюю общеобразовательную школу № 62 и в 1974 г. поступил на специальность теоретическая физика физического факультета Иркутского государственного университета, которую успешно окончил в 1979 г.

Еще будучи студентом написал свою первую научную работу «Колебания тросовой системы в потоке жидкости», посвященную вопросам динамики тросовых систем, применяемых при буксировке подводных аппаратов.

Сразу после окончания университета поступил в аспирантуру к профессору А.Н. Панченкову – известному в научном мире специалисту в области гидроаэродинамики. После окончания аспирантуры в 1982 г. остался работать научным сотрудником Иркутского вычислительного центра СО АН СССР (в настоящее время ИДСТУ СО РАН им В.М. Матросова).

В 1990 г. в Институте теоретической и прикладной механики СО АН СССР (г. Новосибирск) защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности «Механика жидкостей, газа и плазмы». Тема диссертации: «Оптимизация геометрии крыла вблизи опорной поверхности» вызвала большой интерес специалистов. В ней впервые в допущении умеренных околоэкранных возмущений были получены сложные (по форме в плане, поперечному изгибу и местным углам атаки) трёхмерные геометрии крыльев конечного размаха с максимальной подъёмной силой, максимальным градиентом подъёмной силы по отстоянию, максимальным градиентом момента крена по крену. Задачи имеют исключительное значение для обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации экранопланов.

Будучи сотрудником Иркутского вычислительного центра работал по правительственным тематикам. Разрабатывал алгоритмы для систем автоматизированной навигации, алгоритмы распознавания образов и обработки изображений, методы теории экспертных систем. Один из разработчиков концепции сетевого взаимодействия летательных аппаратов, движущихся в группе. Участвовал в разработке и поддержке программного обеспечения по заказам органов государственной власти и управления, руководства Иркутской области, крупных коммерческих компаний (Иркутский алюминиевый завод, авиакомпания «Байкал» и др.).

С 1996 по 2011 гг. сотрудник Восточно-Сибирского института МВД России. Служил в должностях преподавателя, доцента, начальника факультета послевузовского профессионального образования. Полковник милиции в отставке.

В 2007 г. в Иркутском государственном университете путей сообщения защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора технических наук по научной специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Тема диссертации: «Исследование и разработка математических моделей обработки неполных и противоречивых данных на основе логик с векторной семантикой». В диссертации были представлены результаты по введённому им новому классу логик, обобщающих нечёткие и классические логики. Результаты диссертации сегодня находят применение в теории экспертных систем и анализе больших данных.

С 2011 по 2021 гг. работал в Иркутском государственном университете путей сообщения в должности заведующего кафедрой «Информационные системы и защита информации». С 2021 г. профессор этой кафедры. Ведёт подготовку бакалавров, магистров, аспирантов. Имеет двух защищённых учеников. Автор более 250 научных и научно-методических работ. Области научных интересов: гидроаэродинамика, математическое моделирование, искусственный интеллект, теория



систем, информационная безопасность. Член-корреспондент Российской академии естествознания и Российской инженерной академии. Член Российской ассоциации искусственного интеллекта.

Является ученым секретарем диссертационного совета 44.2.002.01, созданного на базе Иркутского государственного университета путей сообщения, по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. А также член диссертационного совета Д 003.021.01, созданного на базе Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН.

Входит в состав редакционной коллегии научных журналов «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами» и «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (входит в перечень ВАК).

Награждён грамотами Министерства внутренних дел и Министерства образования и науки РФ. Имеет ведомственные награды МВД России.

### Наиболее крупные научные результаты

#### ***В области гидроаэродинамики***

– Доказал достаточность обобщенного условия Мунка для минимума индуктивного сопротивления крыла, движущегося на сверхмалых отстояниях от опорной поверхности.

– Впервые, в допущении умеренных околоэкранных возмущений, получил сложные (по форме в плане, поперечному изгибу и местным углам атаки) трёхмерные геометрии крыльев с максимальной подъёмной силой, максимальным градиентом подъёмной силы по отстоянию, максимальным градиентом момента крена по крену. Последние две задачи имеют исключительное значение для обеспечения безопасной эксплуатации аппаратов на динамической воздушной подушке.

#### ***В области управления сложными системами***

– Предложил такие навигационные алгоритмы как метод частотно-координатной привязки для ориентирования по рельефу местности, метод взвешенного центра тяжести для ориентирования по неподвижным точкам (звёздам).

– Один из разработчиков концепции сетевого взаимодействия летательных аппаратов, движущихся в группе.

#### ***В области искусственного интеллекта***

– Предложил технологию сегментных баз данных для интеллектуальной обработки и анализа изображений.

– Заложил основы теории логик с векторной семантикой – нового класса логик, свободных от принципов противоречия и исключённого третьего.

#### ***В области теории систем и системного анализа***

– Предложил метод логико-аксиологического оценивания систем, позволяющий учитывать влияние ключевых компонентов системы, отказ (нефункциональность) которых влечёт нефункциональность всей системы в целом или соответствующих подсистем.

– Показал, что некоторые свойства систем зависят не от их физической природы, а от факта принадлежности к классу агрегируемых, для которых суммарный эффект функционирования определяется совокупным вкладом отдельных компонентов (подсистем и функциональных элементов).

#### ***В области информационной безопасности***

– Является одним из авторов метода побитового рассеяния-разнесения файлов, направляемых во внешние хранилища данных. Метод обеспечивает гарантированную защиту информации пользователя от несанкционированного доступа на стороне провайдера.

### Разработка программного обеспечения

– Участвовал в разработках пакетов прикладных программ «Полёт» (проектирование одного класса экранопланов) и «МИКРОН» (управление летательными аппаратами специального типа).

– Участвовал в разработке программного обеспечения по заказам различных комитетов Иркутской области (в настоящее время министерства), авиакомпании «Байкал», Иркутского алюминиевого завода. В качестве автора и соавтора имеет свидетельства о регистрации программного обеспечения: обучающей программы «TEACHLAB TESTMASTER 2005»; инструментальных оболочек для разработки экспертных систем «HERACLIT 2006» и «Гераклит 2.Х»; программы логико-аксиологического оценивания систем «лАос» и «лАос 2.Х»; программы, реализующей метод побитового рассеяние-разнесения файлов «Vis» и др.

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

**№ 3 (75)**  
**2 0 2 2**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

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

Подписано в печать 24.10.2022. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 31.10.2022

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 24,53.

Уч.-изд. л. 16,64. Тираж 500 экз. Заказ № 3645

Подписной индекс по каталогу «Урал-Пресс»: 64556

ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ РАН.

Сведения о журнале ежегодно

публикуются в международной справочной системе

по периодическим и продолжающимся изданиям

«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01

Маркировка информационной продукции - не маркируется

Цена свободная

Адрес редакции, издательства и типографии

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения

Телефон: 8(3952) 63-83-57, 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)