

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

Иркутский государственный университет путей сообщения • Irkutsk State Transport University • 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

2021 № 4(72)

Современные технологии.  
Системный анализ. Моделирование

ISSN 1813-9108 (Print)

# Современные технологии Системный анализ Моделирование

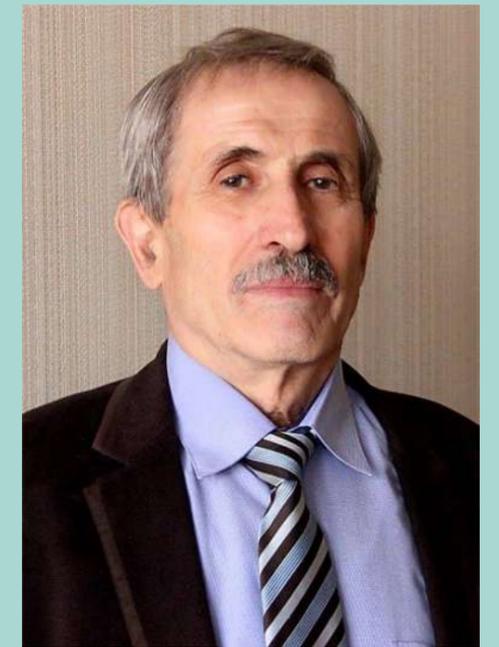
2021  
№ 4 (72)

Иркутский государственный  
университет путей сообщения

Машиностроение • Машиноведение • Энергетические системы • Транспорт

Д.т.н., профессор

**Юрий Мечеславович**



«Разработка  
специального про-  
граммно-матема-  
тического обеспе-  
чения для оценки  
эффективности и  
надежности слож-  
ных систем в усло-  
виях неопределен-  
ности и риска».

**КРАКОВСКИЙ**

Machine Building • Theoretical Engineering • Energy Systems • Transport

# Modern technologies System analysis Modeling

2021  
No. 4 (72)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

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

**№ 4 (72)**  
**2 0 2 1**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

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

---

#### Приоритетные цели журнала

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

#### Стратегические задачи

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

#### Учредитель и издатель

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

#### Главный редактор

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

#### Заместители главного редактора

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

#### Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Телефон:** +7(3952) 638-389; **Факс:** +7(3952) 38-77-46

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

**e-mail:** [stsam@ircgups.ru](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 науки и высшего образования РФ по специальностям: машиностроение и машиноведение; транспорт.

# Modern technologies System analysis Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)

2021  
No. 4 (72)

Founded in 2004

Published quarterly

## Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

### Aims and Scope

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

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

### Founder and publisher

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

### Editor-in-Chief

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

### Deputy Editor-in-Chief

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

### Editorial council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Tel.:** +7(3952) 638-389; **Fax:** +7(3952) 38-77-46

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

**e-mail:** [stsam@irgups.ru](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 ПИИ № ФС77-66109 от June 20, 2016

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

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

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

- Mechanical engineering and mechanical science;
- Transport.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Машиностроение, машиноведение и энергетические системы**

<b>Четвериков С. В.</b> Разработка конструкции экспериментальной оснастки для подавления автоколебаний технологической системы при торцовом фрезеровании .....	10
<b>Артюнин А. И., Барсуков С. В., Суменков О. Ю.</b> Исследование угловой скорости вращения маятника на вращающемся валу механической системы .....	21
<b>Белоголов Ю. И.</b> Совершенствование конструкции подъемного клапана, разгруженного от действия давления рабочей среды .....	29

**Транспорт**

<b>Михайлов Д. А., Пыхалов А. А., Зеньков Е. В., Артюнин А. И.</b> Методика испытания образцов из эластомеров для получения механических характеристик их гиперупругости и конечно-элементного моделирования деформируемых сборных конструкций .....	38
<b>Асламова В. С., Асламов А. А., Головкова Е. А., Шнегельбергер Е. А.</b> Автоматизированный расчет трехлопастной пропеллерной мешалки для производства серосодержащего сорбента на основе хлорлигнина, селективного к ионам тяжелых металлов .....	48
<b>Нестерова Н. С., Анисимов В. А.</b> Принятие решений по этапному изменению облика и мощности мультимодальной транспортной сети .....	59
<b>Шухарев С. А., Гуляев А. В.</b> Система экстремального управления вспомогательным приводом электровозов .....	68
<b>Нехаев В. А., Леоненко Е. Г.</b> Исследование условий движения порожнего состава по участкам различного профиля .....	78
<b>Пинчуков П. С.</b> Исследование вариантов подключения микропроцессорных терминалов защит тяговых подстанций .....	87
<b>Мартыненко Л. В., Воронова Ю. В., Иванова В. А.</b> Применение радиолокационного зондирования подповерхностных исследований при оценке сходов грузовых вагонов .....	96
<b>Полтавская Ю. О.</b> Методология проектирования интермодальных терминалов в транспортных системах .....	104
<b>Федосов А. Д., Антерейкин Е. С.</b> Сравнительный анализ потребности проведения ремонта левобережной трамвайной сети города Новосибирска .....	112
<b>Пультяков А. В., Менакер К. В., Востриков М. В., Орлов А. В.</b> Микропроцессорное устройство для непрерывного мониторинга и визуализации температуры окружающего воздуха работниками локомотивных бригад .....	123
<b>Ветрогон А. А., Крипак М. Н., Дружинина М. В.</b> Проектирование кольцевых пересечений с различными приоритетами направлений движения с учетом распределения транспортных потоков .....	132
<b>Макашева С. И.</b> Анализ качества электрической энергии в питающей сети 220 кВ с присоединенными тяговыми подстанциями .....	143

<b>Лебедева О. А., Гозбенко В. Е.</b> Методология моделирования грузовых перевозок на основе статистических данных товарных групп .....	152
<b>Доможирова А. Д., Упырь Р. Ю.</b> О влиянии задержек маршрутных поездов на восстановление графика движения поездов .....	161
<b>Власова Н. В., Оленцевич В. А., Асташков Н. П.</b> Прогнозные значения обращений по наиболее прогрессивным каналам привлечения клиентов с учетом влияния транспортного рынка .....	169
<b>Знаенко В. Н., Иванов В. Н.</b> Применение различных способов пропуска поездов .....	179
<b>Макаров В. В., Семченко В. В.</b> Плавное регулирование возбуждения на электровозах однофазно-постоянного тока .....	188
<b>Крюков А. В., Любченко И. А.</b> Моделирование режимов систем электроснабжения Стационарных объектов железных дорог .....	195

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

<b>Дубровская Т. А., Кравченя И. Н., Стрижак А. И.</b> Особенности применения программного обеспечения Microsoft Project при расчете календарного плана строительства .....	212
---	-----

### **Персоналии**

Д.т.н., профессор Ю. М. Краковский .....	225
--	-----

## CONTENTS

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

<b>Chetverikov S. V.</b> Development of the design of the experimental fitting to suppress autooscillations of technological system during the face milling .....	10
<b>Artyunin A. I., Barsukov S. V., Sumenkov O. Yu.</b> Research of the angular velocity of rotation of the pendulum on the rotating shaft of the mechanical system .....	21
<b>Belogolov Yu. I.</b> Improvement of the design of the lift valve, relieved from the action of the pressure of the working medium .....	29

**Transport**

<b>Mikhailov D. A., Pykhalov A. A., Zen'kov E. V.</b> Technique for testing samples from elastomers to obtain the mechanical characteristics of their hyperelasticity and finite element modeling of deformable assembly structures .....	38
<b>Aslamova V. S., Aslamov A. A., Golovkova E. A., Shnegelberger E. A.</b> Automated calculation of a three-vane propeller mixer for production of the sulfur-containing sorbent based on chlorolignin selective to heavy metal ions .....	48
<b>Nesterova N. S., Anisimov V. A.</b> Decision-making to gradually change the appearance and capacity of the multimodal transport network .....	59
<b>Shukharev S. A., Gulyaev A. V.</b> Extreme control system of auxiliary drive of electric locomotives .....	68
<b>Nekhaev V. A., Leonenko E. G.</b> Investigation of the conditions of movement of an empty train on plots of various profiles .....	78
<b>Pinchukov P. S.</b> Microprocessor protection terminals of traction substations: Study of connection variants .....	87
<b>Martynenko L. V., Voronova Yu. V., Ivanova V. A.</b> Application of radar sounding of subsurface studies in the assessment of freight car descents .....	96
<b>Poltavskaya Yu. O.</b> Methodology of planning intermodal terminals in transport systems .....	104
<b>Fedosov A. D., Anterejkin E. S.</b> Comparative demand analysis for repair of the left-bank tram network of the city of Novosibirsk .....	112
<b>Pulyakov A. V., Menaker K. V., Vostrikov M. V., Orlov A. V.</b> Microprocessor device for continuous monitoring and visualization of ambient air temperature by locomotive crews workers .....	123
<b>Vetrogon A. A., Kripak M. N., Druzhinina M. V.</b> Designing of turnarounds with different traffic direction priorities taking into account traffic flow distribution .....	132
<b>Makasheva S. I.</b> Power quality analysis in the 220 kV supply network with connected traction substations .....	143

<b>Lebedeva O. A., Gozbenko V. E.</b> Methodology for modeling freight transportation based on statistical data of commodity groups .....	152
<b>Domojirova A. D., Upyr R. Yu.</b> On the influence of delays in route trains on the recovery of train graphics .....	161
<b>Vlasova N. V., Olencevich V. A., Astashkov N. P.</b> Forecast values of requests for the most progressive channels of attracting customers, taking into account the influence of the transport market .....	169
<b>Znaenok V. N., Ivanov V. N.</b> Application of different methods of train passage .....	179
<b>Makarov V. V., Semchenko V. V.</b> Smooth excitation control on single-phase-direct current electric locomotives .....	188
<b>Kryukov A. V., Lyubchenko I. A.</b> Modeling of power supply systems of stationary railway objects .....	195

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

<b>Dubrovskaya T. A., Kravchenya I. N., Strizhak A. I.</b> Features of using Microsoft Project software when calculating the construction schedule .....	212
--	-----

### **Personalities**

Doctor of Technical Sciences, Professor Yu. M. Krakovsky .....	225
--	-----

## 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;
- ~~фаворитный~~ ~~авторство~~, 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 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.

~~Структура~~ ~~формат~~ (структура подраздела пункта разделов, заключение).

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

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

При вставке формул использовать только Microsoft Equation 3 с параметрами:

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

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

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

Статьи, представляемые в журнал, проходят обязательное рецензирование.

Самоцитирование журнала в статьях **запрещено**.

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

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

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

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

Иркутский государственный университет путей сообщения. Аудитория Г-302. Гозбенко Валерий Ерофеевич.

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

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МАШИНОВЕДЕНИЕ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

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

## Разработка конструкции экспериментальной оснастки для подавления автоколебаний технологической системы при торцовом фрезеровании

С. В. Четвериков✉

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

✉ serga652008@yandex.ru

### Резюме

Одним из самых нежелательных явлений, проявляющихся при обработке нежестких деталей, является возникновение автоколебаний заготовки, вследствие чего происходит ухудшение шероховатости и точности обработанной поверхности, преждевременный износ инструмента и выход его из строя. Решению проблемы повышения динамической устойчивости технологической системы при обработке нежестких деталей посвящено много различных научных работ. В производственных условиях для снижения опасности возникновения автоколебаний чаще всего изменяют режимы резания, что влечет за собой потерю производительности. Для борьбы с автоколебаниями, возникающими при обработке деталей, разработаны разные способы. Суть их в основном сводится к применению различных демпферов. Для борьбы с автоколебаниями более целесообразным является не гашение возникающих автоколебаний, а создание условий для их исключения. Такой подход строится на основе понимания физики процесса возбуждения автоколебаний. В представленной работе исследована принципиальная возможность гашения автоколебаний путем применения стандартных режущих пластин с измененным значением заднего угла. В ходе работы решена научно-техническая проблема повышения динамической устойчивости процесса торцевого фрезерования нежестких заготовок. Рассмотрены существующие способы и средства повышения виброустойчивости и производительности процессов торцевого фрезерования. Выбран перспективный путь подавления автоколебаний путем использования инструмента с режущими пластинами с измененным задним углом. Экспериментально доказана возможность гашения вибраций за счет изменения значения заднего угла режущей пластины. Разработана методика проведения экспериментов, сделаны необходимые измерения. Проведенные исследования показали целесообразность использования режущих пластин с измененным задним углом при фрезеровании нежестких деталей.

### Ключевые слова

автоколебания, фрезерование нежестких заготовок, инструмент, режущая пластина, динамическая устойчивость, скорость резания

### Для цитирования

Четвериков С. В. Разработка конструкции экспериментальной оснастки для подавления автоколебаний технологической системы при торцовом фрезеровании // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 10–20. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).10-20

### Информация о статье

поступила в редакцию: 15.09.2021, поступила после рецензирования: 10.10.2021, принята к публикации: 27.10.2021

## Development of the design of the experimental fitting to suppress autooscillations of technological system during the face milling

S. V. Chetverikov✉

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

✉ serga652008@yandex.ru

### Abstract

One of the most undesirable phenomena that occur when processing non-rigid parts is the occurrence of self-oscillation of the work piece, which results in: deterioration of the roughness and accuracy of the treated surface, premature wear of the tool and its failure. Therefore, many scientific papers have been devoted to solving the problem of increasing the dynamic stability of a technological system when processing non-rigid parts. In production conditions, to reduce the risk of self-oscillation, cutting modes are most often changed, which leads to loss of productivity. Various methods have been developed to deal with self-oscillations that occur during the processing of parts. Their essence is mainly reduced to the use of various dampers. To deal with self-oscillations, it is more appropriate not to extinguish the arising self-oscillations, but to create conditions for their non-occurrence. This approach is based on an understanding of the physics of the self-oscillation excitation process. In this paper, the principal possibility of damping self-oscillations by using standard cutting plates with a modified value of the rear angle is investigated. In the course of the work, the scientific and technical problem of increasing the dynamic stability of the process of face milling of non-rigid work pieces was solved. The existing methods and means of increasing vibration stability and productivity of face mill-

ing processes are considered. A promising way to suppress self-oscillation by using a tool with cutting plates with a modified back angle is selected. The possibility of vibration damping by changing the value of the rear angle of the cutting plate is experimentally proved. The method of conducting experiments was developed, and the necessary measurements were made. Studies have shown the feasibility of using cutting plates with a modified back angle when milling non-rigid parts.

### Keywords

autooscillations, milling of nonrigid work parts, tool, cutting plate, dynamic stability, cutting speed

### For citation

Chetverikov S. V. Razrabotka konstruksii ehksperimental'noy osnastki dlya podavleniya avtokolebaniy tekhnologicheskoy sistemy pri tortsovom frezerovanii [Development of the design of experimental equipment for suppressing self-oscillations of the technological system during face milling]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 10–20. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).10-20

### Article Info

Received: 15.09.2021, Revised: 10.10.2021, Accepted: 27.10.2021

### Введение

Фрезерование характеризуется высокой динамичностью нагружения системы, приближающегося к ударному воздействию. Особенно это проявляется при обработке узких поверхностей. Периодическое резание приводит к возникновению вынужденных колебаний и автоколебаний. В данной работе исследована принципиальная возможность гашения автоколебаний путем применения стандартных режущих пластин с измененным значением заднего угла. Для борьбы с автоколебаниями, возникающими при обработке деталей, разработаны различные способы. Суть их в основном сводится к применению различных демпферов [1–4]. Для борьбы с автоколебаниями более целесообразным является создание условий для их исключения. Такой подход строится на основе понимания физики процесса возбуждения автоколебаний [5–8]. В данном случае объектом исследования является изучение динамической устойчивости процесса торцевого фрезерования нежестких заготовок [9, 10], а предметом исследования – рекомендации по изменению зна-

чения заднего угла режущих пластин стандартной фрезы.

### Оборудование, инструмент, приспособление

Для создания податливости к автоколебаниям было изготовлено приспособление (рис. 1).

Приспособление представляет собой упругую П-образную державку, закрепленную в станочных тисках. Заготовка 2 крепится к приспособлению 4 шестью болтами М10. В отверстие шпинделя устанавливается оправка с фрезой 1. Токовихревой датчик 3 устанавливается на магнитную стойку 5 и настраивается таким образом, чтобы зазор между датчиком и приспособлением составил 1,6 мм. Зазор выставляется с помощью щупа. Датчик подключается к модулю ZET LAB 210, который соединен с персональным компьютером, для вывода данных на экран монитора и их обработки.

### Заточка режущих пластин торцевой фрезы

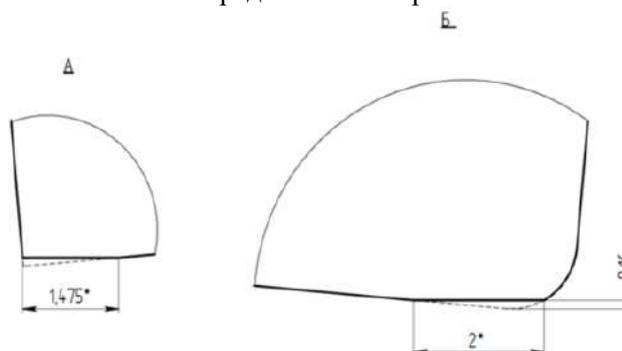
Режущая пластина состоит из четырех граней, поэтому на одном наборе пластин можно произвести восемь вариантов заточки. [11–15].



Рис. 1. Настройка оборудования перед началом опытов

Fig. 1. Setting up equipment before starting experiments

В первую очередь затачивался нулевой задний угол на всех восьми гранях пластин до достижения 2 мм нулевой площадки. Предварительная заточка пластин представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Предварительная заточка пластин  
**Fig. 2.** Pre-sharpening of plates

После заточки пластин экспериментальную фрезу установили на фрезерный станок. Проверку радиального и торцевого биения зубьев по их вершинам по главной режущей кромке осуществляли с помощью индикаторной головки часового типа с ценой деления 0,005 мм. Измерительный индикатор закрепляли в стандартной стойке, установленной на столе фрезерного станка. Измерение биения зубьев по вершинам и главной режущей кромки выполнялись при каждом повороте пластины на необходимый задний угол (рис. 3).

Показаны результаты проверки радиального и торцевого биения зубьев экспериментальной фрезы перед проведением опытов (табл. 1).



**Рис. 3.** Измерение радиального и торцевого биения зубьев  
**Fig. 3** Measurement of radial and face runout of teeth

**Таблица 1.** Результаты измерений радиального и торцового биения зубьев

**Table 1.** Results of measurements of radial and face run out of teeth

Угол заточки пластин, град.	Радиальное биение / торцовое биение, мкм
0	-25/5
-2	10/-20
-4	-15/10
-6	30/15
-8	25/-10
-10	30/15
-12	20/20
-14	30/-5

### Приспособление для создания регулируемой пониженной жесткости заготовки

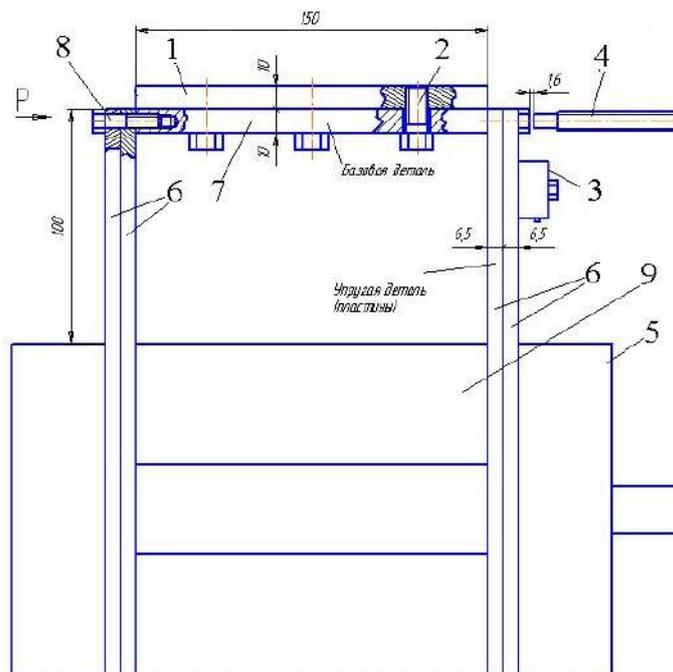
Предварительные опыты фрезерования стандартной фрезой диаметром 125 мм, числом зубьев 10 на горизонтально-фрезерном станке модели 6М82 показали, что возбуждение автоколебаний в технологической системе происходит при работе с большими глубинами резания [16]. Для доказательства явления гашения автоколебаний принято решение исследовать

процесс обработки нежестких заготовок, где возникновение автоколебаний происходит при небольших глубинах резания [17]. Для имитации нежесткой заготовки создано П-образное приспособление (рис. 4).

Приспособление состоит из четырех упругих пластин 6, соединенных между собой базовой пластиной 7 при помощи винтов 8. Заготовка 1 крепится болтами 2 к базовой пластине. Затем приспособление устанавливается в тисы 5, между пластинами 6 вставляются цилиндрические проставки 9. Вылет державки приспособления  $L_{заг}$ , т. е. расстояние от торца базовой пластины 7 до торца тисов 5, регулируется путем разжатия губок тисов, при этом приспособление свободно перемещается вдоль поперечной подачи станка. В данном случае вылет державки настроен на расстояние 100 мм.

### Описание конструкции

Приспособление представлено упругой П-образной державкой, закрепленной в станочных тисах. Державка состоит из четырех упругих пластин толщиной 6,5 мм, шириной 90 мм и длиной 400 мм, соединенных опорной пла-



**Рис. 4.** Схема П-образного приспособления:

1 – заготовка; 2 – болт; 3 – пьезоэлектрический датчик; 4 – токовихревой датчик; 5 – тисы; 6 – упругие пластины; 7 – базовая пластина; 8 – винт; 9 – цилиндрическая проставка

**Fig. 4.** Diagram of a U-shaped device:

1 – blank; 2 – bolt; 3 – piezoelectric sensor; 4 – eddy current sensor; 5 – jaws; 6 – elastic plates; 7 – base plate; 8 – screw; 9 – cylindrical spacer

стиной посредством шести болтов М6 и четырех штифтов. Обрабатываемая заготовка в виде пластины закрепляется на опорной пластине шестью винтами М10.

Заготовка 2 (рис. 5) крепится к П-образному приспособлению 3 шестью болтами М10. Приспособление устанавливается в тисы 7 и притягивается прихватом 6, тисы крепятся на столе фрезерного станка. В отверстие шпинделя устанавливается оправка с фрезой 1. Магнитная стойка 5 с токовихревым датчиком 4, закрепленным с помощью изоленды, устанавливается на стол станка таким образом, чтобы зазор между датчиком и приспособлением составил 1,6 мм. Зазор выставляется с помощью щупа. Токовихревой датчик подключается к модулю ZET LAB 210, который соединен с персональным компью-

тером, для вывода данных на экран монитора и их обработки. Модуль обработки и сбора данных ZETLab210 представлен на рис. 6. ZETLab210 – это аналого-цифровой преобразователь предназначенный для измерений параметров сигналов с высокой точностью и большим динамическим диапазоном, поступающих с различных первичных преобразователей: термосопротивлений, термопар, датчиков с универсальным токовым выходом 4–20 мА. Так же он предназначен для решения задач измерения и управления в области сейсмоки, вибраций, термометрии, тензометрии и т. д. [14, 15]. Программа из состава ZETLab210 обрабатывает сигналы, поступающие на входные каналы анализаторов спектра, сейсмостанций, тензостанций, плат АЦП ЦАП, интеллектуальных датчиков.



**Рис. 5.** Настройка оборудования перед началом опытов

**Fig. 5.** Setting up equipment before starting experiments



**Рис. 6.** Модуль ZETLab210

**Fig. 6.** ETLab210 module



**Рис. 7.** Установка измерения жесткости приспособления:

1 – индикаторная головка; 2 – магнитная стойка; 3 – динамометр; 4 – П-образное приспособление

**Fig. 7.** Fixture stiffness measurement setting:

1 – indicator head; 2 – magnetic rack; 3 – dynamometer; 4 – U-shaped device

Сигналы на модуль подаются токовихревым бесконтактным датчиком AP2000A (рис. 5, поз. 4) измеряющим динамическое или статическое перемещение объекта относительно места крепления. Измерительная система состоит из бесконтактного датчика, демодулятора (драйвера) и соединительного кабеля. Эти системы используются для измерения радиальной и осевой вибрации, эксцентриситета и осевого перемещения вала, расширения кожуха и разностного расширения и случаев, где должны быть произведены бесконтактные относительные измерения.

### Измерение жесткости П-образного устройства

Измерение жесткости П-образного приспособления важно для расчета режимов резания при полуступовом фрезеровании [18]. Измерение жесткости под нагрузкой осуществля-

ли с помощью индикаторной головки 1 часового типа с ценой деления 0,01 мм и образцового динамометра 3 сжатия ДОС М-3-03 системы Токарева. В направлении поперечной подачи нагружали и разгружали ступенчато П-образную державку (рис. 7). Результаты измерения жесткости приведены в табл. 2. Построен график нагрузки и разгрузки (рис. 8).

Жесткость приспособления составила:

$$J = \frac{P}{\Delta},$$

$$J = \frac{250}{0,53} = 4716981 \text{ Н/м}.$$

### Результаты экспериментов резания режущих пластин с разным значением заднего угла

Режущие пластины экспериментальной фрезы были заточены восемью способами согласно табл. 1. Для оптимального заднего угла

Таблица 2. Результаты измерений жесткости приспособления  
Table 2. Fixture stiffness measurement results

Смещение $\Delta$ , мм	P, Н										
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Нагрузка 1	0	0,05	0,1	0,16	0,22	0,28	0,34	0,41	0,48	0,54	0,62
Разгрузка 1	0,02	0,09	0,15	0,22	0,29	0,35	0,41	0,47	0,53	0,58	0,62
Нагрузка 2	0	0,05	0,11	0,17	0,23	0,29	0,35	0,42	0,48	0,55	0,62
Разгрузка 2	0,02	0,08	0,15	0,21	0,28	0,33	0,4	0,46	0,52	0,58	0,62
Нагрузка 3	0	0,05	0,1	0,17	0,23	0,29	0,35	0,41	0,48	0,55	0,62
Разгрузка 3	0,01	0,07	0,14	0,2	0,27	0,33	0,4	0,46	0,52	0,57	0,62

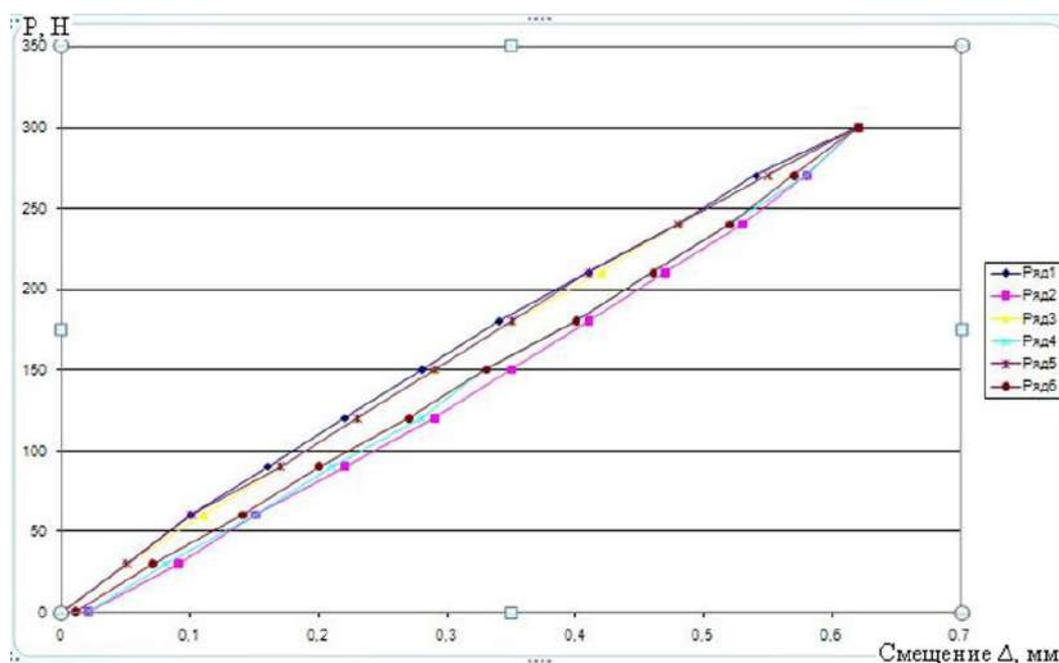
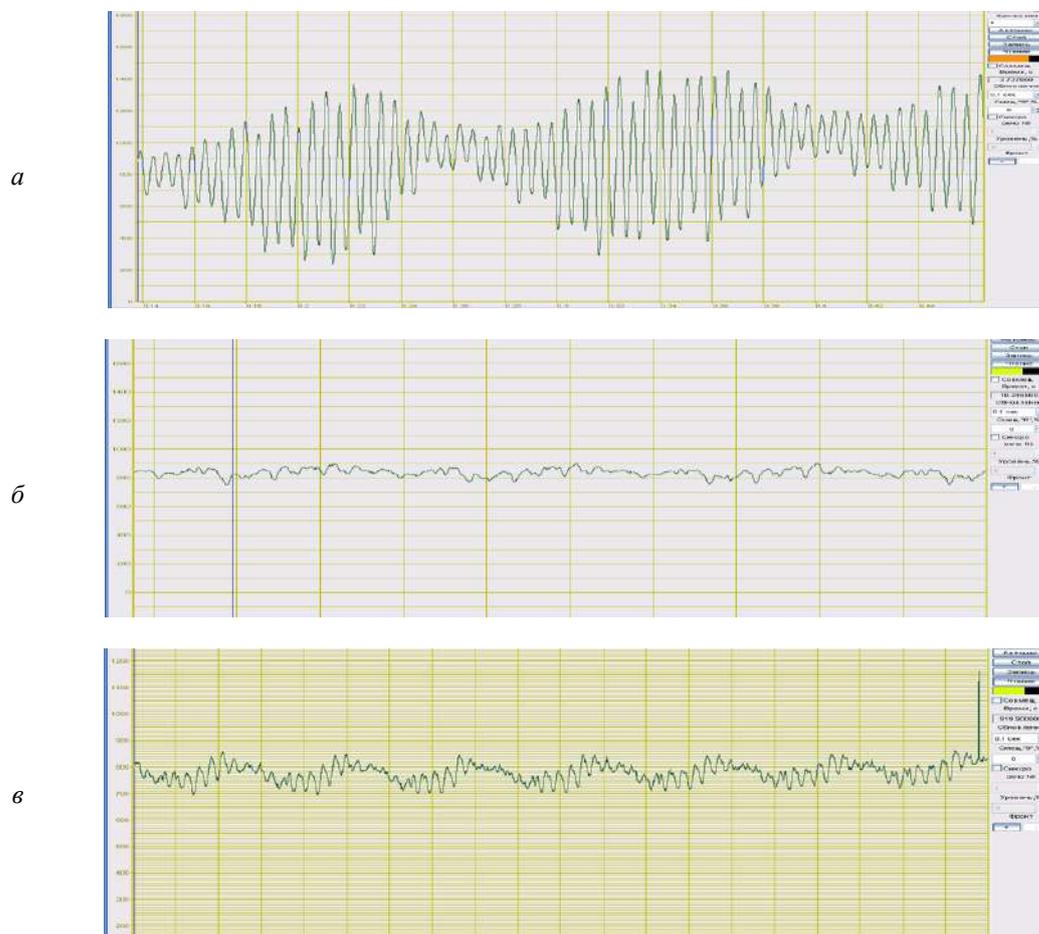


Рис. 8. График нагрузки и разгрузки П-образной державки  
Fig. 8. Graph of loading and unloading of the U-shaped holder

заготовку обрабатывали режущими пластинами с разным задним углом в условиях, аналогичных обработке заготовки стандартными пла-

стинами. Получены виброграммы, спектрограммы токовихревого датчика и поверхность обработанной заготовки (рис. 9–11).

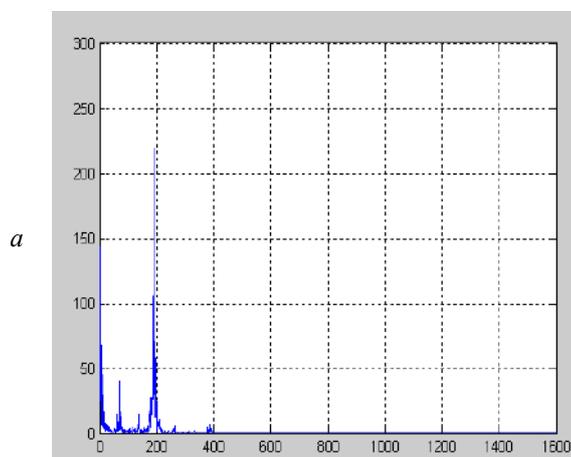


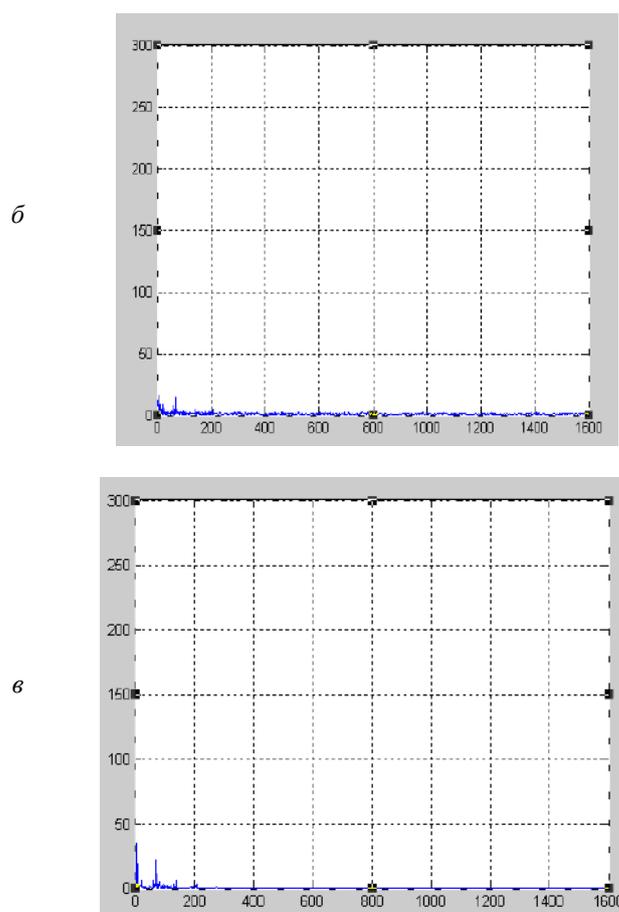
**Рис. 9.** Виброграммы колебаний заготовки при обработке экспериментальными пластинами с отрицательным задним углом:

$a - (0^\circ)$ ;  $b - (-8^\circ)$ ;  $c - (-14^\circ)$

**Fig. 9.** Vibrograms of the workpiece vibrations during processing with experimental plates with a negative clearance angle:

$a - (0^\circ)$ ;  $b - (-8^\circ)$ ;  $c - (-14^\circ)$





**Рис. 10.** Спектрограммы колебаний заготовки при обработке экспериментальными пластинами с отрицательным задним углом:  
 $a - (0^\circ)$ ;  $б - (-8^\circ)$ ;  $в - (-14^\circ)$

**Fig. 10.** Spectrograms of billet vibrations during processing with experimental plates with negative clearance angle:  
 $a - (0^\circ)$ ;  $b - (-8^\circ)$ ;  $c - (-14^\circ)$



**Рис. 11.** Обработанная поверхность заготовки экспериментальными пластинами с отрицательным задним углом:  
 $a - (0^\circ)$ ;  $б - (-8^\circ)$ ;  $в - (-14^\circ)$

**Fig. 11.** The processed surface of the work piece with experimental plates with a negative clearance angle  
 $a - (0^\circ)$ ;  $b - (-8^\circ)$ ;  $c - (-14^\circ)$

По спектрограммам и виброграммам была составлена таблица амплитуды вынужденных колебаний заготовки и автоколебаний, а также частоты колебаний в зависимости от угла заточки пластин (табл. 3). На основании полученных результатов был построен график зависимости амплитуды колебаний от угла заточки пластин (рис. 12).

### Выбор конструктивных параметров приспособления

Расчет П-образной державки заготовки для торцового фрезерования в условиях пониженной жесткости технологической системы представлен ниже.

Объем материала базовой детали с заготовкой найден по формуле:

$$V_{Д+б} = 0,02 \cdot 0,09 \cdot 0,15 = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Их общая масса составит

$$M_{Д+б} = V_{Д+б} \cdot \rho = 2,7 \cdot 10^{-4} \cdot 7,814 = 2,11 \cdot 10^{-3} \text{ т} = 2,11 \text{ кг}.$$

Объем одной пружины

$$V_{ПР} = 0,0065 \cdot 0,09 \cdot 0,1 = 5,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

При колебании участвует примерно  $\frac{1}{3}$

массы консольно защемленной пружины.

$$M_{ПР} = 5,85 \cdot 10^{-5} \cdot 7,814 = 4,57 \cdot 10^{-3} \text{ т} = 0,457 \text{ кг}.$$

Общая приведенная колеблющаяся масса

$$M_{\text{общ}} = M_{Д+б} + \frac{1}{3} \cdot 6 \cdot M_{ПР} = 2,11 + 2 \cdot 0,457 \approx 3,02 \text{ кг}.$$

Жесткость при действии силы  $P$ , найденная экспериментально

$$j = 4838710 \text{ Н/м}.$$

Таблица 3. Результаты экспериментов

Table 3. Experimental results

№ опыта	Угол заточки пластин, град.	Амплитуда вынужденных колебаний заготовки		Амплитуда автоколебаний заготовки	
		Амплитуда $A$ , мкм	Частота $f$ , Гц	Амплитуда $A$ , мкм	Частота $f$ , Гц
1	Стандартные пластины	70	69	230	195
2	0	40	69	225	193
3	-2	60	69	80	192
4	-4	40	69	60	193
5	-6	25	65	45	198
6	-8	15	70	3,5	194
7	-10	22	69	1,5	193
9	-12	6	68	1	194
10	-14	22	69	1,5	194

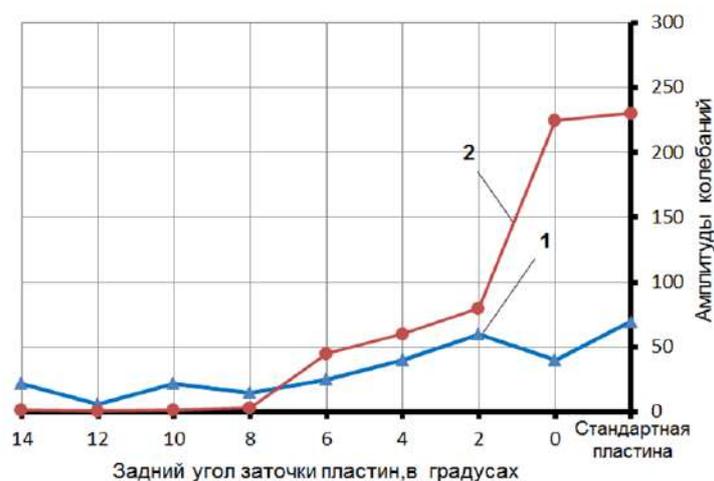


Рис. 12. График зависимости амплитуд колебаний заготовки от угла заточки пластин

Fig. 12. The graph of the dependence of the vibration amplitudes of the work piece on the angle of sharpening of the plates

Частота собственных колебаний

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{j}{M}} = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{4838710}{3,02}} = 201,5 \text{ Гц.}$$

Экспериментально измеренная  $f = 151,5 \text{ Гц.}$

Примем  $v = 90 \text{ м/мин:}$

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi D} = \frac{1000 \cdot 90}{3,14 \cdot 125} = 229 \text{ об/мин.}$$

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 125 \cdot 229}{1000} = 89,88 \text{ м/мин} = 1,49 \text{ м/с.}$$

Длина волны автоколебаний

$$l = \frac{v}{f} = \frac{1,49}{182,5} = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 8,1 \text{ мм.}$$

### Заключение

На основании полученных результатов проведенных экспериментов можно сделать выводы.

Обработка заготовки с применением стандартных пластин сопровождается актив-

ными вибрациями, амплитуда автоколебаний заготовки равна 230 мкм, а вынужденных колебаний 70 мкм. Обработка заготовки экспериментальными пластинами с отрицательным задним углом показала, что с увеличением значения заднего угла амплитуда автоколебаний и вынужденных колебаний заметно уменьшается. По графику (см. рис. 12) видно, что автоколебания заготовки изменились с 230 мкм до 1 мкм, а вынужденные колебания с 70 мкм до 6 мкм. Анализируя полученные результаты можно сказать, что оптимальный отрицательный задний угол заточки пластин равен минус 8°.

Проведенное исследование показало, что предложенный способ является эффективным для подавления автоколебаний, и правильная заточка режущих пластин с отрицательным задним углом позволяет реализовать этот способ.

Для имитации пониженной жесткости обрабатываемой заготовки разработано, изготовлено и испытано приспособление.

### Список литературы

1. Хрунев Ю.М., Дыжин В.А. Торцовые фрезы с механическим креплением пластин // *Машиностроитель*. 1986. № 3. С. 20–21.
2. Розенберг А.М. Динамика фрезерования. М.: Советская наука, 1945. 360 с.
3. Шишков В.Д. Неравномерность работы торцовой фрезы // *Станки и инструмент*. 1970. № 7.
4. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и демпфирующего протягивания. Киев: Наукова думка, 1990. 320 с.
5. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
6. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 199 с.
7. Шаламов В.Г. Теоретические основы взаимосвязи параметров инструмента с динамикой фрезерования листовых заготовок: специальность 05.03.01 «Процессы механической и физико-технической обработки, станки и инструмент»: дисс. ... д-ра техн. наук / Шаламов Виктор Георгиевич. Техн. ун-т. Санкт-Петербург, 1992. 344 с.
8. Власов В.В. Подавление автоколебаний при торцовом фрезеровании путем регулирования шага зубьев инструмента: дис. ... магистр. техн. наук. Чита, 2011. 103 с.
9. Дулен, Падке, Ву. Расчет торцевой фрезы с минимальной вибрацией с помощью усовершенствованной модели силы резания // *Труды Американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения*. 1976. № 3. С. 38–41.
10. Косилова А.Г. Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
11. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.
12. Вульф А.М. Резание металлов. М.: Машиностроение, 1973. 496 с.
13. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 303 с.
14. Шишков В.Д. Оптимальное расположение заготовки относительно твердосплавной торцовой фрезы // *Станки и инструмент*. 1969. № 6. 148 с.
15. Клепиков В.В. Бодров А.Н. Технология машиностроения. М.: ФОРУМ, 2008. 864 с.
16. Свинин В.М., Самородов П.А., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю. Исследование нежесткой технологической системы при торцовом фрезеровании инструментом с переменным шагом зубьев // *Системы. Методы. Технологии*. 2016. № 4. С. 39–44.
17. Пузанов Ю.В. Исследование устойчивости движения системы при торцовом фрезеровании: специальность 05.03.01 «Процессы и машины обработки материалов резанием; автоматические линии»: дисс. ... канд. техн. наук / Пузанов Юрий Владимирович. Ленинград: Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина, 1980. 240 с.
18. Хаэт Г.Л. [и др.]. Сборный твердосплавный инструмент. М.: Машиностроение, 1989. 256 с.

### References

1. Khruney Yu.M., Dyzhin V.A. Tortsovye frezy s mekhanicheskim krepleniem plastin [End mills with mechanical fastening of plates]. *Mashinostroitel [Mechanical engineer]*. 1986, no 3, pp. 20–21.

2. Rosenberg, A.M. Dinamika frezerovaniya [Dynamics of milling]. Moscow: Sovetskaya Nauka Publ., 1945. 360 p.
3. Shishkov V.D. Neravnomernost' raboty tortsovoj frezy [Unevenness of the face milling cutter]. *Stanki i instrument [Machine tools and tools]*. 1970, no 7.
4. Rosenberg A.M., Rosenberg O.A. Mekhanika plasticheskogo deformirovaniya v protsessakh rezaniya i dempfirovaniya [Mechanics of plastic deformation in the processes of cutting and damping pulling]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1990. 320 p.
5. Kudinov V.A. Dinamika stankov [Dynamics of machine tools]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967. 359 p.
6. Kedrov S.S. Kolebaniya metallorezhushhikh stankov [Oscillations of metal-cutting machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 199 p.
7. Shalamov V.G. Teoreticheskie osnovy vzaimosvyazi parametrov instrumenta s dinamikoj frezerovaniya listovykh zagotovok [Theoretical foundations of the relationship of tool parameters with the dynamics of milling sheet blanks]. Doctor's thesis, Sankt-Peterburg, Technical University, 1992, 344 p.
8. Vlasov V.V. Podavlenie avtokolebanij pri tortsovom frezerovanii putem regulirovaniya shaga zub'ev instrumenta [Suppression of self-oscillations in face milling by adjusting the pitch of the tool teeth]. Master's thesis. Chita, 2011. 103 p.
9. Doolin, Padke, Wu. Raschet tortsovoj frezy s minimal'noj vibratsiej s pomoshh'yu usovershenstvovannoj modeli sily rezaniya [Calculation of a face mill with minimal vibration using an advanced cutting force model]. *Trudy Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroeniya [Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers. Design and technology of mechanical engineering]*. 1976, no 3, pp. 38–41.
10. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya: v 2 tomakh [Handbook of a mechanical engineer: in 2 volumes]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 496 p.
11. Vasin S.A., Vereshchak A.S., Kushner B.S. Rezanie materialov: Termomekhanicheskij podkhod k sisteme vzaimosvyazey pri rezanii [Cutting materials: Thermomechanical approach to the system of interconnections during cutting]. Moscow: MSTU Publ., 2001. 448 p.
12. Wulf A.M. Rezanie metallov [Metal cutting]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1973. 496 p.
13. Granovskiy G.I., Granovskiy V.G. Rezanie metallov [Metal cutting]. Moscow: Vyschaya shkola, 1985. 303 p.
14. Shishkov V.D. Optimal'noe raspolozhenie zagotovki otnositel'no tverdosplavnoj tortsovoj frezy [Optimal positioning of the workpiece relative to the carbide end mill]. *Stanki i instrument [Machines and tools]*. 1969, no 6. 148 p.
15. Klepikov V.V., Bodrov A.N. Tekhnologiya mashinostroeniya [Mechanical engineering technology]. Moscow: FORUM Publ., 2008. 864 p.
16. Svinin V.M., Samorodov P.A., Lobanov D.V., Skiba V.Yu. Issledovanie nezhestkoj tekhnologicheskoy sistemy pri tortsovom frezerovanii instrumentom s peremennym shagom zub'ev [Investigation of a non-rigid technological system in face milling with a tool with a variable tooth pitch]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*. 2016, no 4, pp. 39–44.
17. Puzanov Yu.V. Issledovanie ustojchivosti dvizheniya sistemy pri tortsovom frezerovanii [Investigation of the stability of the movement of the system during face milling]. Candidate's thesis. Leningrad, Leningrad Polytechnic Institute, 1980, 240 p.
18. Hayot G.L. [and others]. Sbornyj tverdosplavnyj instrument [Prefabricated carbide tool]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1989. 256 p.

#### Информация об авторах

**Четвериков Сергей Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры подвижного состава железных дорог, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: serga652008@yandex.ru

#### Information about the authors

**Sergey V. Chetverikov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department Rolling Stock of Railways, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: serga652008@yandex.ru

## Исследование угловой скорости вращения маятника на вращающемся валу механической системы

А. И. Артюнин<sup>1</sup>✉, С. В. Барсуков<sup>1</sup>, О. Ю. Суменков<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Научно-технологический университет «Сириус», г. Сочи, Российская Федерация

✉ artyunin\_ai@irgups.ru

### Резюме

Настоящая работа посвящена дальнейшему исследованию эффекта «застревания» маятника на вращающемся валу механической системы. Суть этого эффекта заключается в том, что при определенном соотношении между моментом трения в опоре маятника, установленного с возможностью свободного вращения на валу ротора двигателя механической системы, и его массой или длиной имеет место такой режим движения, когда ротор вращается с заданной угловой скоростью, а угловая скорость (частота вращения) маятника совпадает с одной из собственных частот механической системы. Исследования проводились на модели с двумя степенями свободы и маятником, установленным с возможностью свободного вращения на валу этой механической системы. Для данной модели с маятником получены нелинейные дифференциальные уравнения, неразрешенные относительно старших производных. В результате численного интегрирования этих уравнений построены законы вращения маятника при разных коэффициентах трения в его опоре, в том числе при «застревании» маятника на собственных частотах модели. Путем обоснованных допущений выведено обособленное дифференциальное уравнение движения маятника на вращающемся валу модели. Из этого уравнения наглядно можно увидеть, что на вращение маятника на валу механической системы и, соответственно, на возникновение эффекта «застревания» влияет не только трение в опоре маятника, но и собственная частота колебаний и демпфирование механической системы. Расчетные кривые законов разгона маятника при интегрировании системы уравнений и обособленного уравнения показали хорошее совпадение, что свидетельствует о достоверности полученных результатов. Проведено исследование влияния демпфирования на возможность возникновения эффекта «застревания» маятника на вращающемся валу.

### Ключевые слова

маятник, угловая скорость, вращающийся вал, механическая система, эффект «застревания», демпфирование

### Для цитирования

Артюнин А. И. Исследование угловой скорости вращения маятника на вращающемся валу механической системы / А. И. Артюнин, С. В. Барсуков, О. Ю. Суменков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 21–28. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).21-28

### Информация о статье

поступила в редакцию: 24.11.2021, поступила после рецензирования: 30.11.2021, принята к публикации: 02.12.2021

## Research of the angular velocity of rotation of the pendulum on the rotating shaft of the mechanical system

A. I. Artyunin<sup>1</sup>✉, S. V. Barsukov<sup>1</sup>, O. Yu. Sumenkov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> The Sirius University of Science and Technology, Sochi, the Russian Federation

✉ artyunin\_ai@irgups.ru

### Abstract

One of the most undesirable phenomena that occur when processing non-rigid parts is the occurrence of self-oscillation of the This work deals with further research of the effect of «sticking» of a pendulum on the rotating shaft of a mechanical system. Essentially, with a certain ratio between the friction torque in the support of the pendulum mounted with the possibility of free rotation on the mechanical system rotor shaft, and its mass and length there is such a mode of motion when the rotor spins with a given angular velocity, and the angular velocity (rotation frequency) coincides with one of the natural frequencies of the mechanical system. Researches were conducted in the model with two degrees of freedom and a pendulum mounted with the possibility of free rotation on the shaft of its mechanical system. Nonlinear differential equations, not solved with respect to a higher derivative, were obtained for this model with a pendulum. As a result of a numerical integration of these equations, the laws of the pendulum rotation with different friction coefficients in its support are formulated, including the case when the pendulum “sticks” on the natural frequencies of the model. By means of substantiated assumptions, a separate differential equation of the pendulum motion on the rotating shaft of the model was derived. From this equation one can clearly see that the rotation of the pendulum

on the shaft and, respectively, the effect of «sticking» are influenced not only by friction in the pendulum's support, but also by the natural frequency of oscillations and damping of the mechanical system. Calculated curves of the pendulum's acceleration laws during the integration of the system of equations showed close coincidence, which is indicative of the veracity of the results obtained. A research of the influence of damping on the likelihood of the effect of “sticking” of the pendulum on the rotating shaft was carried out.

### Keywords

pendulum, angular velocity, rotating shaft, mechanical system, sticking effect, damping

### For citation

Artynin A. I., Barsukov S. V., Sumenkov O. Yu. Issledovanie uglovoj skorosti vrashheniya mayatnika na vrashhayushhemsya valu mekhanicheskoy sistemy [Research of the angular velocity of rotation of the pendulum on the rotating shaft of the mechanical system]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 21–28. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).21-28

### Article info

Received: 24.11.2021, Revised: 30.11.2021, Accepted: 02.12.2021

### Введение

Данная работа является продолжением цикла работ по изучению эффекта «застревания» маятника на вращающемся валу механической системы. Суть этого эффекта заключается в том, что при определенном соотношении между моментами трения в опоре маятника, установленно с возможностью свободного вращения на валу ротора механической системы, и его массой или длиной имеет место такой режим движения, когда ротор вращается с заданной угловой скоростью, а угловая скорость маятника (частота вращения) совпадает с одной из резонансных частот механической системы [1–4].

Маятник является уникальным объектом исследований и практического применения, а также основным элементом механических часов, маятник Фуко используется в эксперименте по доказательству вращения Земли. Маятник Фроуда иллюстрирует возможность появления автоколебаний. Маятниковые детали служат гасителями колебаний, маятник применяется при геофизических изысканиях. С помощью маятников Максвелла и Обербека демонстрируются законы механики. Это далеко не полный перечень применения маятников.

Колебания маятника с неподвижной точкой подвеса под действием силы тяжести изучали еще основоположники механики Г. Галилей [5], И. Ньютон [6], Х. Гюйгенс [7]. Исследования движения маятника с малыми углами отклонения положили начало линейной теории механических колебаний. Другое направление исследований возникло, когда стали изучать движение маятника с колеблющейся точкой подвеса [8, 9]. Основополагающими в этой области исследований являются

работы академиков Н.Н. Боголюбова [10, 11] и П.Л. Капицы [12, 13]. Оригинальные исследования маятниковых систем, открывших их новые свойства, проведены известными учеными В.Н. Челомеем [14] и К.М. Рагульским [15]. Обширная библиография в этой области приведена в работе [16]. В настоящее время также активно проводятся исследования динамики маятниковых систем с колеблющейся точкой подвеса, в том числе с применением современных компьютерных программ аналитических вычислений [17–19].

В свое время академик П.Л. Капица писал, что ни одной из механических систем не было уделено столько внимания и теоретического изучения как всем разновидностям маятника. Казалось бы, что за 300 лет, прошедших со времен Галилея, этот вопрос должен быть исчерпан если, что осталось для изучения, то это должно было носить характер дошлифовки ранее полученных результатов» [13]. Это академик написал, когда обнаружил новые возможности маятника с вибрирующей точкой подвеса. Однако маятник и в наше время обнаружил свои новые свойства, а именно: при проведении экспериментальных исследований возможности автоматической балансировки роторов с помощью маятников был обнаружен эффект «застревания» маятника на резонансных частотах механической системы. Однако, несмотря на результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования качественная картина этого явления до конца еще не ясна. Не исследовано, например, влияние параметров механической системы на условия возникновения и существование нового явления.

Целью настоящей работы является изучение угловой скорости вращения маятника на вращающемся валу на простой модели механической системы, вывод формулы закона изменения угловой скорости маятника и оценка влияния демпфирования механической системы на закон изменения угловой скорости маятника.

### Выбор и описание движения модели механической системы с маятником на вращающемся валу

Исследуемая модель (рис. 1) представляет собой корпус твердого тела симметричной кубической формы, который закреплен на неподвижном основании с помощью симметрично расположенных четырех вертикальных и четырех горизонтальных невесомых упругих опор.

В корпусе установлен уравновешенный ротор с валом. На валу ротора установлен маятник с возможностью вращения относительно вала. Ось вращения ротора проходит через центр масс корпуса (точка  $O_1$ ). На рис. 1 также изображены демпферы, условно обозначающие наличие сопротивления пропорционального скорости движения корпуса.

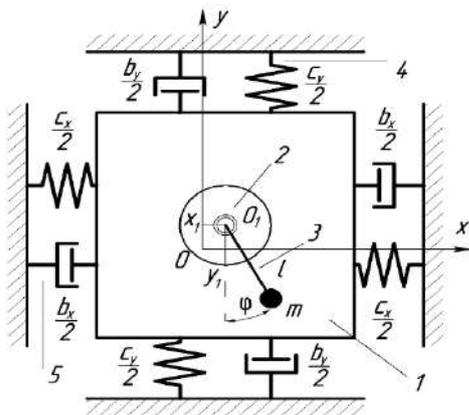


Рис. 1. Механическая модель маятника, вращающегося на валу двигателя, установленного в корпусе:

1 – корпус (точка  $O_1$  – центр масс корпуса и ротора);  
2 – ротор; 3 – маятник; 4 – невесомые упругие опоры корпуса; 5 – демпферы корпуса

Fig. 1. Mechanical model of the pendulum rotating on the shaft on an engine mounted in the body:

1 – body (point  $O_1$  is a body and rotor mass centre);  
2 – rotor; 3 – pendulum; 4 – weightless elastic supports of the body; 5 – dampers of the body

Движение модели будем изучать по отношению к неподвижной системе координат  $Oxyz$ , начало которой (точка  $O$ ) совпадает с

центром масс корпуса в положении его статического равновесия. Будем также считать, что движение вдоль оси  $z$  и поворот вокруг осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  отсутствуют. Тогда для описания движения модели можно использовать три обобщенных координаты:  $x_1$ ,  $y_1$  – перемещения центра масс корпуса,  $\theta_1$  – вращение ротора. Кроме того, угол отклонения маятника от его нижнего положения обозначим  $\varphi$ .

Для вывода дифференциальных уравнений движения модели используем уравнения Лагранжа 2-го рода в следующей форме:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{dT}{dq_i} = - \frac{d\Pi}{dq_i} - \frac{d\Phi}{dq_i} + Q_\varphi, \quad (1)$$

где  $T$  – кинетическая энергия механической системы;  $q_i$  – обобщенная координата;  $\Pi$  – потенциальная энергия механической системы;  $\Phi$  – функция Релея (функция рассеивания);  $Q_\varphi = k(\omega - \dot{\varphi})$ . Здесь  $\omega$  – угловая скорость ротора;  $\dot{\varphi}$  – угловая скорость маятника;  $k$  – коэффициент сопротивления относительно вращению маятника на валу ротора.

При выбранных обобщенных координатах выражение для кинетической энергии модели, которая складывается из кинетической энергии корпуса, кинетической энергии ротора и кинетической энергии маятника, имеет вид:

$$T = \frac{1}{2} M (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} I_p \omega^2 + ml (\dot{x}_1 \dot{\varphi} \cos \varphi + \dot{y}_1 \dot{\varphi} \sin \varphi) + \frac{1}{2} m l^2 \dot{\varphi}^2.$$

В этом выражении  $M = M_k + M_p + m$  ( $M_k$  – масса корпуса;  $M_p$  – масса ротора;  $m$  – масса маятника);  $I_p$  – момент инерции ротора;  $l$  – длина маятника.

Выражение для потенциальной энергии, которое складывается из потенциальной энергии деформации упругих опор в горизонтальном и вертикальном направлениях и потенциальной энергии сил тяжести корпуса, ротора и маятника с учетом условия статического равновесия имеет вид:

$$\Pi = \frac{1}{2} c_x x_1^2 + \frac{1}{2} c_y y_1^2 - mgl \cos \varphi.$$

Здесь  $c_x$ ,  $c_y$  – суммарная жесткость невесомых опор в горизонтальном и вертикальном направлениях;  $g$  – ускорение свободного падения.

Выражение для функции Релея при наличии демпфирования корпуса будет иметь вид:

$$\Phi = \frac{1}{2}b_x \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}b_y \dot{y}_1^2,$$

где  $b_x, b_y$  – коэффициенты сопротивления движению корпуса в горизонтальном и вертикальном направлениях.

После процедуры Лагранжа (1) получим систему трех дифференциальных уравнений для описания движения модели:

$$\begin{cases} M\ddot{x}_1 + b_x \dot{x}_1 + c_x x_1 = ml(\dot{\varphi}^2 \sin \varphi - \ddot{\varphi} \cos \varphi); \\ M\ddot{y}_1 + b_y \dot{y}_1 + c_y y_1 = -ml(\dot{\varphi}^2 \cos \varphi + \ddot{\varphi} \sin \varphi); \\ ml^2 \ddot{\varphi} + ml\ddot{x}_1 \cos \varphi + ml\ddot{y}_1 \sin \varphi = \\ = \mu(\omega - \dot{\varphi}) - mgl \cos \varphi. \end{cases}$$

### Моделирование закона вращения маятника

Задачей вычислительного эксперимента, который заключался в численном интегрировании системы уравнений (2), являлось построение зависимости угловой скорости маятника от момента сопротивления в опоре маятника на валу при постоянстве остальных параметров механической системы. При расчете принимались следующие исходные данные:  $M_k = 8$  кг;  $M_p = 2$  кг;  $m = 0,02$  кг;  $l = 0,05$  м;  $c = c_x = c_y = 100\,000$  Н/м;  $b_x = b_y = 100$  Н·с/м. Как видно из исходных данных исследуемая механическая система имеет одну собственную частоту колебаний  $k = \sqrt{\frac{c}{M}} = 100$  рад/с. Примем также,

что при  $0 \leq t \leq 6$  с ротор вращается по закону  $\omega = 50t$ , а при  $t > 6$  с угловая скорость ротора  $\omega = 300$  рад/с.

На рис. 2 представлены законы вращения маятника при различных коэффициентах трения  $\mu$  в его опоре.

Как видно из графиков, при значении  $\mu = 0,142 \cdot 10^{-3}$  Н·м·с и  $\mu = 0,495 \cdot 10^{-3}$  Н·м·с угловая скорость маятника равна собственной частоте колебаний механической системы, т. е. наблюдается эффект «застревания» маятника на валу механической системы. При дальнейшем увеличении коэффициента сопротивления угловая скорость маятника стремится к угловой скорости ротора (линии  $\omega$ ).

### Вывод обособленного уравнения вращения маятника на валу механической системы

Для системы уравнений (2) введем обозначения:  $c_x = c_y = c$ ;  $b_x = b_y = b$ ;  $\frac{b}{M} = 2n$ ;

$\frac{c}{M} = k^2$ ;  $\frac{ml}{M} = h$ . Тогда эту систему уравнений

можно записать в виде:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + 2n\dot{x}_1 + k^2 x_1 = h(\dot{\varphi}^2 \sin \varphi - \ddot{\varphi} \cos \varphi); \\ \ddot{y}_1 + 2n\dot{y}_1 + k^2 y_1 = -h(\dot{\varphi}^2 \cos \varphi + \ddot{\varphi} \sin \varphi); \\ ml^2 \ddot{\varphi} + \mu(\dot{\varphi} - \omega) = -ml(\ddot{x}_1 \cos \varphi + \ddot{y}_1 \sin \varphi) - \\ - mgl \cos \varphi. \end{cases} \quad (3)$$

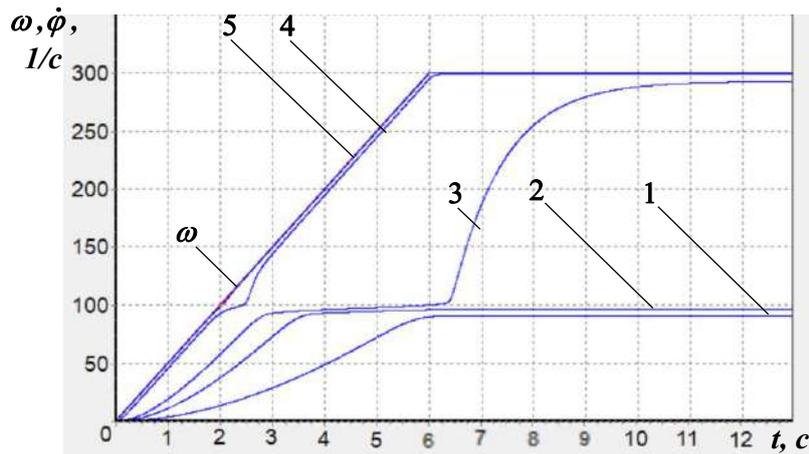


Рис. 2. Законы движения маятника при различных значениях коэффициента трения в его опоре:

1 –  $\mu = 0,142 \cdot 10^{-3}$  Н·м·с; 2 –  $\mu = 0,495 \cdot 10^{-3}$  Н·м·с; 3 –  $\mu = 0,001 \cdot 10^{-3}$  Н·м·с;

4 –  $\mu = 0,01 \cdot 10^{-3}$  Н·м·с; 5 –  $\mu = 0,1 \cdot 10^{-3}$  Н·м·с

Fig. 2. Laws of pendulum motion under different values of friction coefficient in its bearer

1 –  $\mu = 0,142 \cdot 10^{-3}$  N·m·s; 2 –  $\mu = 0,495 \cdot 10^{-3}$  N·m·s; 3 –  $\mu = 0,001 \cdot 10^{-3}$  N·m·s;

4 –  $\mu = 0,01 \cdot 10^{-3}$  N·m·s; 5 –  $\mu = 0,1 \cdot 10^{-3}$  N·m·s

Будем далее считать, что  $\dot{\varphi}^2 \gg \ddot{\varphi}$ , тогда первые два уравнения системы (3) примут вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 + 2n\dot{x}_1 + k^2 x_1 = h\dot{\varphi}^2 \sin \varphi; \\ \dot{y}_1 + 2n\dot{y}_1 + k^2 y_1 = -h\dot{\varphi}^2 \cos \varphi. \end{cases} \quad (4)$$

Это неоднородные линейные уравнения 2-го порядка с постоянными коэффициентами. Общее решение каждого из них состоит из суммы двух решений: общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения:

$$x_1 = x_1^* + x_2^{**}; \quad y_1 = y_1^* + y_2^{**}.$$

Выражения для общего решения однородных уравнений известны:

$$\begin{aligned} x_1^* &= e^{-nt} (C_1 \sin k_1 t + C_2 \cos k_1 t); \\ y_1^* &= e^{-nt} (C_3 \sin k_1 t + C_4 \cos k_1 t), \end{aligned}$$

где  $k_1 = \sqrt{k^2 - n^2}$ .

В дальнейшем будем считать, что свободные колебания затухают и учитывать их не будем. Частные решения будем искать в виде:

$$x_1^{**} = a_1 \sin \varphi + b_1 \cos \varphi; \quad y_1^{**} = a_2 \sin \varphi + b_2 \cos \varphi.$$

Производные от этих выражений при учете  $\dot{\varphi}^2 \gg \ddot{\varphi}$  будут равны:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1^{**} &= \dot{\varphi}(a_1 \cos \varphi - b_1 \sin \varphi); \\ \dot{y}_1^{**} &= \dot{\varphi}(a_2 \cos \varphi - b_2 \sin \varphi); \\ \ddot{x}_1^{**} &= \dot{\varphi}^2(a_1 \sin \varphi + b_1 \cos \varphi); \\ \ddot{y}_1^{**} &= \dot{\varphi}^2(a_2 \sin \varphi + b_2 \cos \varphi). \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя далее соотношения (5) в (4) и приравнявая выражения соответственно при  $\cos \varphi$  и  $\sin \varphi$ , получим:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{h\dot{\varphi}^2(k^2 - \dot{\varphi}^2)}{(k^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n^2\dot{\varphi}^2}; \\ b_1 &= -\frac{h\dot{\varphi}^2(2n\dot{\varphi})}{(k^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n^2\dot{\varphi}^2}; \\ a_2 &= -\frac{h\dot{\varphi}^2(2n\dot{\varphi})}{(k^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n^2\dot{\varphi}^2}; \\ b_2 &= -\frac{h\dot{\varphi}^2(k^2 - \dot{\varphi}^2)}{(k^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n^2\dot{\varphi}^2}. \end{aligned}$$

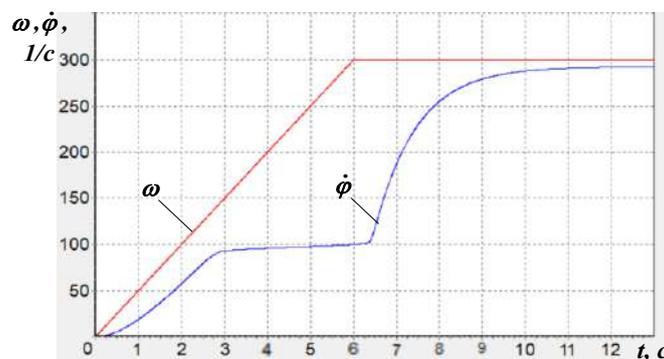
Подставляя далее найденные частные решения в третье уравнение системы (3), получим обособленное дифференциальное уравнение для описания движения маятника на валу механической системы:

$$ml^2\ddot{\varphi} + \mu(\dot{\varphi} - \omega) = -\frac{mlh\dot{\varphi}^2(2n\dot{\varphi})}{(k^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n^2\dot{\varphi}^2} - mgl \cos \varphi. \quad (6)$$

Приведем это уравнение к нормальному виду, поделив обе части уравнения на  $ml^2$ :

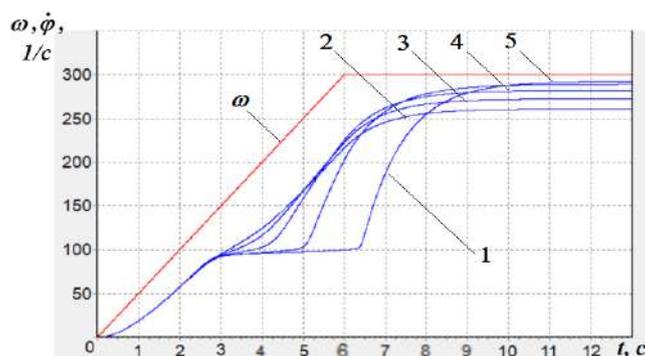
$$\ddot{\varphi} + \beta(\dot{\varphi} - \omega) = -\frac{m\dot{\varphi}^4(2n\dot{\varphi})}{M(k^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n^2\dot{\varphi}^2} - \frac{g \cos \varphi}{l}. \quad (7)$$

Из этого уравнения наглядно видно, что на вращение маятника на валу механической системы и, соответственно, на возникновение эффекта «застревания» маятника влияет, в первую очередь, момент сопротивления в опоре маятника и, во вторую – собственная частота колебаний и демпфирование механической системы. Внешне система уравнений (3) и уравнение (7) похожи на уравнения, приведенные в работах И.И. Блехмана [20, 21], посвященные описанию эффекта Зоммерфельда.



**Рис. 3.** Закон движения маятника при значении коэффициента трения  $\mu = 0,001 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$  при коэффициенте демпфирования  $b = 100 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$

**Fig. 3.** Laws of pendulum motion under friction coefficient  $= 0,001 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$  and damping coefficient  $b = 100 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}$



**Рис. 4.** Исследование влияния коэффициента демпфирования  $b$  на угловую скорость маятника при  $\mu = 0,001 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ :

$1 - b = 100 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ ;  $2 - b = 150 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ ;  $3 - b = 200 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ ;  $4 - b = 250 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ ;  $5 - b = 300 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$

**Fig. 4.** Study of damping coefficient  $b$  effect on pendulum's angular velocity at  $\mu = 0,001 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ :

$1 - b = 100 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ ;  $2 - b = 150 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ ;  $3 - b = 200 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ ;  $4 - b = 250 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ ;  $5 - b = 300 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$

Интегрирование уравнения (7) проводилось при тех же исходных данных, что и при численном решении системы (2). В результате был получен закон движения маятника на валу механической системы (рис. 3).

Этот график построен при тех же данных, что и для построения закона движения 3 (рис. 2), когда вначале наблюдается «застывание» маятника на угловой скорости, равной собственной частоте колебаний механической системы, а затем маятник разгоняется до угловой скорости ротора. Кривые практически совпадают, что свидетельствует о достоверности полученных результатов. Полученное обособленное уравнение движения маятника на валу механической системы дает возможность оценить влияние демпфирования механической системы на законы движения маятника (рис. 4).

Демпфирование существенно влияет на существование эффекта «застывания» маятника на валу механической системы, а также на его угловую скорость в установившемся режиме вращения. При большом коэффициенте демпфирования рассматриваемый эффект может не проявиться.

Подобное явление «застывания» шаров наблюдалось в шаровом автобаланси́ре. Исследования шаровых автобаланси́ров роторов в [22–24] показали, что в отдельных случаях балансировки не происходит, шары, сблизившись друг с другом, вращаются в камере как единое тело с угловой скоростью, близкой к критической скорости ротора, когда сам он вращается с заданной угловой скоростью (эффект Зоммерфельда).

## Выводы

Получено обособленное дифференциальное уравнение вращения маятника на валу механической системы, позволяющее оценить влияние коэффициента трения в опоре маятника, собственной частоты и закона движения маятника на валу механической системы, которые дали совпадающие результаты. Впервые установлено, что на закон движения маятника и на возникновение эффекта «застывания» маятника на вращающемся валу существенное влияние оказывает демпфирование механической системы. Проведено сравнение результатов двух разных методов.

## Список литературы

1. Артюнин А.И. Исследование движения ротора с автобаланси́ром // Известия вузов. Машиностроение. 1993. № 1. С. 15–18.
2. Артюнин А.И. Эффект «застывания» и особенности движения ротора с маятниковым автобаланси́ром // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 8. С. 443–454.
3. Artyunin A.I., Eliseev S.V., Sumenkov O. Yu. Experimental Studies on Influence of Natural Frequencies of Oscillations of Mechanical system on Angular Velocity of Pendulum on Rotating Shaft // Lecture Notes in Mechanical Engineering ICIE-2018, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering. pp. 159–166.
4. Artyunin A.I., Barsukov C.V., Sumenkov O. Yu. Peculiarities of Motion of Pendulum on Mechanical System Engine Potating Shaft // Lecture Notes in Mechanical Engineering ICIE-2019, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering. V1. pp. 649–657.

5. Галилей Г. Избранные труды в двух томах. М.: Наука, 1964. Т. 2. 572 с.
6. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. М.: ЛЕНАНАД, 2017. 707 с.
7. Гюйгенс Х. Три мемуара по механике. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 578 с.
8. Stephenson A. On a new type of dynamic stability // *Memoirs and Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society*, 1908. Vol. 52. No. 8, pp. 1–10.
9. Erdelyi A. Uber die kleinen Schwingungen eines Pendels mit oszillierenden Aufhangepunkt // *Zeitschrift fur angewandte Mathematik und Mechanik*, 1934. Bd.14, pp. 235–247.
10. Боголюбов Н.Н. О некоторых статистических методах в математической физике. Львов: Изд-во АН УССР, 1945. 137 с.
11. Боголюбов Н.Н. Теория возмущений в нелинейной механике. Киев: Сб. трудов Ин-та строит. механики АН УССР, 1950. Т. 14. С. 9–34.
12. Капица П.Л. Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 1951. Т. 21. Вып. 5. С. 588–597.
13. Капица П.Л. Маятник с вибрирующим подвесом // *Успехи физ. наук*, 1951. Т. XLIV. Вып. 1. С. 7–20.
14. Челомей В.Н. Избранные труды. М.: Машиностроение, 1989. 335 с.
15. Рагульскис К.М. Механизмы на вибрирующем основании (Вопросы динамики и устойчивости). Каунас: Изд-во Ин-та энергетики и электротехники АН ЛитССР, 1963. 232 с.
16. Стрижак Т.Г. Методы исследования динамических систем типа «маятник». Алма-Ата: Наука, 1981. 254 с.
17. Сейранян А.А., Сейранян А.П. Об устойчивости перевернутого маятника с вибрирующей точкой подвеса // *Прикладная математика и механика*, 2006. Т. 70. С. 835–843.
18. Мартыненко Ю.Г., Формальский М.А. Управляемый маятник на подвижном основании // *Известия РАН. Механика твердого тела*, 2013. № 1. С. 9–23.
19. Холостова О.В. Задачи динамики тел с вибрирующим подвесом. Ижевск: изд-во ИКИ, 2016. 308 с.
20. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Физматлит. 1994. 400 с.
21. Блехман И.И. Вибрационная механика и вибрационная реология. М.: Физматлит, 2018. 752 с.
22. Ryzhik V., Sperling L., Duckstein H. Display of the Sommerfeld-Effekt in a Rigid Rotor One-plain Autobalancing Device. *Proc. Of XXX Summer School «Advanced Problems in Mechanics» 2002*. pp. 25–36.
23. Ryzhik V., Sperling L., Duckstein H. Non-synchronous Motions Near Speeds in a Single-plane Autobalancing Device // *Technische Mechanik*. 2004, Vol. 24. pp. 25–36.
24. Lu C.J., Tien M.-H. Pure-rotary periodic motions of a planar two-ball auto-balancer system // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2012. Vol. 32. pp. 251–268.

### References

1. Artyunin A.I. Issledovanie dvizheniya rotora s avtobalansirov [Investigation of the movement of a rotor with an auto-balancer]. *Izvestiya vuzov [Proceedings of Universities]*. 1993. No. 1. Pp. 15–18.
2. Artyunin A.I. Effekt «zastrevaniya» i osobennosti dvizheniya rotora s mayatnikovym avtobalansirov [The effect of "sticking" and features of the movement of the rotor with a pendulum autobalancer]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie [Science and education: an electronic scientific and technical edition]*. Bauman MGTU, 2013. No. 8. Pp. 443–454.
3. Artyunin A.I., Eliseev S.V., Sumenkov O. Yu. Experimental studies on influence of natural frequencies of oscillations of mechanical system on angular velocity of pendulum on rotating shaft. *Lecture notes in mechanical engineering ICIE-2018, Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering*, pp. 159–166.
4. Artyunin A.I., Barsukov S.V., Sumenkov O.Yu. Peculiarities of motion of pendulum on mechanical system engine rotating shaft. *Lecture notes in mechanical engineering ICIE-2019, Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering*, Vol. 1. pp. 649–657.
5. Galilei G. Izbrannye trudy v dvukh tomakh [Selected works in two volumes]. Moscow: Nauka Publ., 1964. Vol. 2. 572 p.
6. N'yuton I. Matematicheskie nachala natural'noi filosofii [Mathematical principles of natural philosophy]. Moscow: LENAANAD Publ., 2017. 707 p.
7. Gyuigens Kh. Tri memuara po mekhanike [Three memoirs on mechanics]. Moscow: AN SSSR Publ., 1951. 578 p.
8. Stephenson A. On a new type of dynamic stability. *Memoirs and Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society*, 1908. Vol. 52, no 8, pp. 1–10.
9. Erdelyi A. Uber die kleinen Schwingungen eines Pendels mit oszillierenden Aufhangepunkt. *Zeitschrift fur angewandte Mathematik und Mechanik*, 1934. Bd.14, pp. 235–247.
10. Bogolyubov N.N. O nekotorykh statisticheskikh metodakh v matematicheskoi fizike [On some statistical methods in mathematical physics]. L'vov: AN USSR Publ., 1945. 137 p.
11. Bogolyubov N.N. Teoriya vozmushchenii v nelineinoi mekhanike [Perturbation theory in nonlinear mechanics]. *Sb. trudov In-ta stroit. mekhaniki AN USSR [Proceedings of works of the University of Structural Mechanics of the AS USSR]*. Kiev: 1950, vol. 14, pp. 9–34.
12. Kapitsa P.L. Dinamicheskaya ustoichivost' mayatnika pri koleblyushcheisya tochke podvesa [Dynamic stability of the pendulum at an oscillating suspension point]. *Zhurnal eksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki [The journal of experimental and theoretical physics]*. 1951, vol. 21. Iss. 5, pp. 588–597.
13. Kapitsa P.L. Mayatnik s vibriruyushchim podvesom [Pendulum with vibrating suspension]. *Uspekhi fiz. nauk [Advances in physical sciences]*. 1951, vol. XLIV/ Iss.1, pp. 7–20.
14. Chelomei V.N. Izbrannye trudy [Selected works]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1989. 335 p.

15. Ragul'skis K.M. Mekhanizmy na vibriruyushchem osnovanii (Voprosy dinamiki i ustoichivosti) [Mechanisms on a vibrating base (Questions of dynamics and stability)]. Kaunas: Izd-vo In-ta ehnergetiki i ehlektrotekhniki AN LitSSR Publ., 1963. 232 p.
16. Strizhak T.G. Metody issledovaniya dinamicheskikh sistem tipa «mayatnik» [Research methods for dynamic systems of the «pendulum» type]. Alma-Ata: Nauka Publ., 1981. 254 p.
17. Seiranyan A.A., Seiranyan A.P. Ob ustoichivosti perevernutogo mayatnika s vibriruyushchei tochkoi podvesa [On the stability of an inverted pendulum with a vibrating suspension point]. *Prikladnaya matematika i mekhanika [Applied mathematics and mechanics]*. 2006, vol. 70, pp. 835–843.
18. Martynenko Yu.G., Formal'skii M.A. Upravlyaemyi mayatnik na podvizhnom osnovanii [Controlled pendulum on a movable base]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela [A journal of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of solids]*. 2013, no 1, pp. 9–23.
19. Kholostova O.V. Zadachi dinamiki tel s vibriruyushchim podvesom [Problems of the dynamics of bodies with vibrating suspension]. Izhevsk: IKI Publ., 2016. 308 p.
20. Blekhman I.I. Vibratsionnaya mekhanika [Vibration mechanics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 1994. 400 p.
21. Blekhman I.I. Vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya reologiya [Vibration mechanics and vibration rheology]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2018. 752 p.
22. Ryzhik B., Sperling L., Duckstein H. Display of the sommerfeld-effekt in a rigid rotor one-plane autobalancing device. *Proc. of XXX Summer School «Advanced Problems in Mechanics»*, 2002, pp. 25–36.
23. Ryzhik B., Sperling L., Duckstein H. Non-synchronous motions near speeds in a single-plane autobalancing device. *Technische Mechanik*, 2004, vol. 24, pp. 25–36.
24. Lu C.J., Tien M.-H. Pure-rotary periodic motions of a planar two-ball auto-balancer system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, vol. 32, pp. 251–268.

### Информация об авторах

**Артюнин Анатолий Иванович** – д-р техн. наук, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: artyunin\_ai@irgups.ru.

**Барсуков Сергей Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, e-mail: bars\_irkunsk@mail.ru.

**Суменков Олег Юрьевич** – магистр Научно-технологического университета «Сириус», Сочи, e-mail: Artunina2107@yandex.ru

### Information about the authors

**Anatolij I. Artyunin** – Doctor of Engineering Science, The Full Professor of the Department Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: artyunin\_ai@irgups.ru.

**Sergey V. Barsukov** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: bars\_irkunsk@mail.ru.

**Oleg Yu. Sumenkov** – Master's Degree of the The Sirius University of Science and Technology, Sochi, e-mail: Artunina2107@yandex.ru

## Совершенствование конструкции подъемного клапана, разгруженного от действия давления рабочей среды

Ю. И. Белоголов ✉

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

✉ belogolov\_yi@irgups.ru

### Резюме

В статье рассматриваются вопросы обеспечения герметичности вторичных уплотнений разгруженных от давления герметизируемой среды подъемных клапанов. В арматуростроении к вторичным уплотнениям относят уплотнения штока в клапанах, шпинделя в задвижках, «компенсирующей части» в разгруженных затворах. В зависимости от условий эксплуатации клапана, потеря герметичности вторичного уплотнения может наступить раньше выхода из строя основного уплотнения затвора, поэтому обеспечение герметичности вторичных уплотнений является не менее важной задачей. Рассматриваемая конструкция клапана является разгруженной от давления рабочей среды. В статье приводится подробное описание уникальности конструктивного решения разгруженного клапана – отсутствие жесткой связи между золотником и седлом затвора клапана. Такое решение обеспечивает возможность любого направления потока рабочей среды (на золотник, под золотник). Вторичные уплотнения в предлагаемой конструкции располагаются непосредственно в золотнике и подвержены износу вследствие поступательного движения. Кроме того, требования по скорости перекрытия потока рабочей среды и ударные нагрузки также не способствуют надежности таких уплотнений. В качестве одного из конструктивных решений предлагается использовать тонкостенные упоры, степень прижатия которых зависит от создаваемого на их площадь давления в затворе клапана. При разгрузке клапана усложняется его конструкция и вследствие этого происходит увеличение его массогабаритных параметров. Для их частичного снижения в клапане предлагается снизить приведенную жесткость тонкостенного седла, что позволит обеспечивать герметичность при меньшем усилии привода.

### Ключевые слова

подъемный клапан, разгрузка от давления, вторичные уплотнения, арматуростроение, рабочая среда, компенсация давления, уплотнительные соединения, герметичность соединения, золотник, седло затвора клапана

### Для цитирования

Белоголов Ю. И. Обеспечение герметичности вторичных уплотнений подъемного клапана // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 29–36. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).29-36

### Информация о статье

поступила в редакцию: 17.11.2021, поступила после рецензирования: 23.11.2021, принята к публикации: 27.11.2021

## Improvement of the design of the lift valve, relieved from the action of the pressure of the working medium

Yu. I. Belogolov ✉

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

✉ belogolov\_yi@irgups.ru

### Abstract

The article discusses the issues of ensuring the tightness of secondary seals of lifting valves unloaded from the pressure of the pressurized medium. In armature engineering, secondary seals include stem seals in valves, spindle seals in valves, and “compensating parts” in unloaded valves. Depending on the operating conditions of the valve, the loss of the tightness of the secondary seal may occur before the failure of the main seal of the gate, therefore, ensuring the tightness of the secondary seals is no less important task. The valve design in question is unloaded from the pressure of the working medium. The article provides a detailed description of the uniqueness of the design solution of the unloaded valve – the absence of a rigid connection between the spool and the valve gate seat. This solution provides the possibility of any direction of the flow of the working medium (to the spool, under the spool). Secondary seals in the proposed design are located directly in the ash and are subject to wear due to translational motion. In addition, the requirements for the flow rate of the working medium and shock loads also do not contribute to the reliability of such seals. As one of the design solutions, it is proposed to use thin-walled stops, the degree of pressure of which depends on the pressure created on their area in the valve gate. When unloading the valve, its design becomes more complicated and, as a result, its weight and size parameters increase. To partially reduce them in the valve, it is proposed to reduce the reduced stiffness of the thin-walled seat, which will ensure tightness with less drive force.

### Keywords

lift valve, relief from pressure, secondary seals, armature engineering, working medium, pressure compensation, sealing joints, joint tightness, spool, valve gate seat

**For citation**

Belogolov Yu. I. Obespecheniye germetichnosti vtorichnykh uplotneniy pod"yemnogo klapana [Sealing the Lift Valve Secondary Seals]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 29–36. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).29-36

**Article Info**

Received: 17.11.2021, Revised: 23.11.2021, Accepted: 27.11.2021

**Введение**

В арматуростроении существуют конструктивные решения, особенность которых заключается в компенсации [1–6] давления рабочей среды в затворе при перекрытии или регулировании.

Клапаны, в которых конструкцией предусмотрена компенсация (частичная или полная) давления рабочей среды, действующего на золоник затвора, называют разгруженными [7]. Разгруженные от действия давления рабочей среды элементы затвора клапана находят применение в конструкциях, где седло чувствительно к условиям нагружения. Например, в уплотнительных соединениях «конус – тонкостенная оболочка».

В зависимости от направления потока рабочей среды на золоник или под золотник может потребоваться либо большее усилие со стороны привода, либо компенсация избыточной герметизирующей нагрузки («самоуплотнение»). Разгрузка от давления рабочей среды и как следствие обеспечение постоянства герметизирующей нагрузки в зоне контакта «золотник – седло» клапана являются основным преимуществом таких конструкций. При этом массогабаритные параметры таких уплотнительных соединений увеличиваются.

Изменение конструкции затвора клапана с целью его разгрузки влияет на количество вторичных соединений, герметичность которых также необходимо обеспечивать.

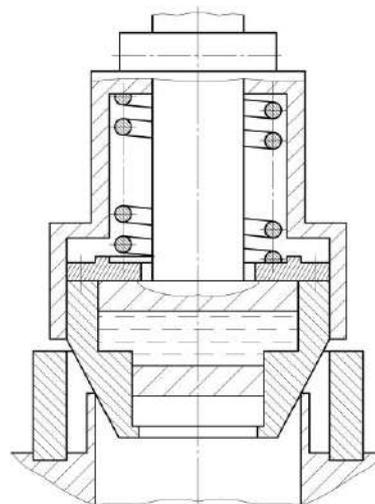
Рассмотрение предлагаемой конструкции с разгруженным затвором, не зависящим от направления потока рабочей среды, вопросов надежности вторичных уплотнений и обеспечения положительных черт, достигаемых использованием соединения «конус – тонкостенное седло», является целью написания научной статьи.

**Разгруженный клапан**

Существует большое многообразие конструктивных решений разгруженных подъемных клапанов [8], в которых для компенсации воздействий от давления среды используются

поршни, мембраны, сифоны и другие элементы. Кроме того, встречается большое многообразие двухседельных конструкций [9], где разгружающим элементом является второй золотник, выполненный, как правило, в виде поршня.

Рассмотрим конструкцию, представленную на рис. 1 [10].



**Рис. 1.** Разгруженный клапан  
**Fig. 1.** Balanced valve

В отличие от существующих конструктивных решений в предлагаемом клапане отсутствует жесткая связь между золотником и штоком привода, что позволяет исключить действие давления рабочей среды при герметизации соединения вне зависимости от направления потока рабочей среды.

Передача давления рабочей среды на элементы затвора происходит посредством малого поршня и разделительной среды. Недостатком такой конструкции является наличие вторичных уплотнений в затворе (малый и большой поршень).

**Вторичные уплотнения**

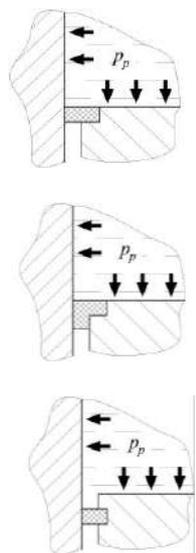
Потеря герметичности вторичных уплотнений может наступить раньше, чем основного, поэтому герметичность вторичных уплотнений необходимо обеспечивать наравне с основным

соединением. При этом использование притертых поверхностей при высоких температурах нецелесообразно из-за термоциклирования.

В настоящее время существуют различные способы повышения герметичности в зоне вторичного соединения. Например, фирма Guardex применяет армирование специальными материалами, однако они разрушаются при высоких давлениях.

Установка дополнительных опорных элементов из термопластичных материалов (рис. 2), например, фторопласта, не обеспечивает требуемую герметичность ввиду следующих причин:

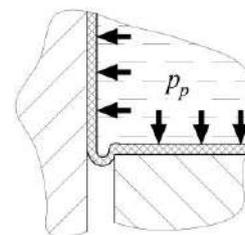
- износ в зоне герметизации поверхностей с каждым срабатыванием увеличивается;
- недостаточная степень прижатия опорных элементов;
- конструктивные неточности при монтаже и сборке;
- потеря уплотнительных свойств при агрессивных средах.



**Рис. 2.** Варианты уплотнительных соединений с упорными кольцами  
**Fig. 2.** Variants of sealing connections with thrust washers

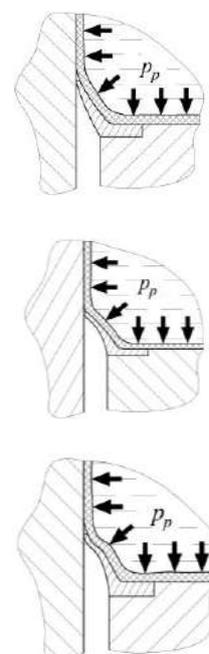
В качестве вторичного уплотнения в рассматриваемой конструкции может выступать, например, силиконовый эластомер.

В [11] указано, что при высоких давлениях и динамических нагрузках такие вторичные уплотнения подвержены повреждениям, вызванным выдавливанием в зазор между элементами уплотнительного соединения (рис. 3).



**Рис. 3.** Разрушение уплотнения в результате выдавливания в зазор  
**Fig. 3.** Destruction of the seal as a result extrusion into the gap

Один из способов обеспечения герметичности таких вторичных уплотнений заключается в использовании тонкостенных металлических элементов (рис. 4).



**Рис. 4.** Варианты уплотнений в виде тонкостенных металлических элементов  
**Fig. 4.** Options for seals in the form of thin-walled metal elements

Под действием  $p_p$  создается давление на поверхность тонкостенного элемента, которое радиально смещает его относительно корпуса, осуществляя плотное прилегание герметизирующих поверхностей и их притирку после каждого цикла нагружения.

Кроме того, возможна комбинация из тонкостенных элементов и фторопластовых уплотнений (рис. 5).

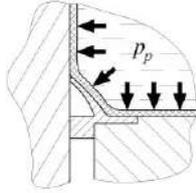


Рис. 5. Комбинированное уплотнение  
Fig. 5. Combined seal

### Перспективная конструкция клапана

Конструкция предлагаемого разгруженного клапана с вторичными уплотнениями в виде тонкостенных металлических элементов [12] представлена на рис. 6.

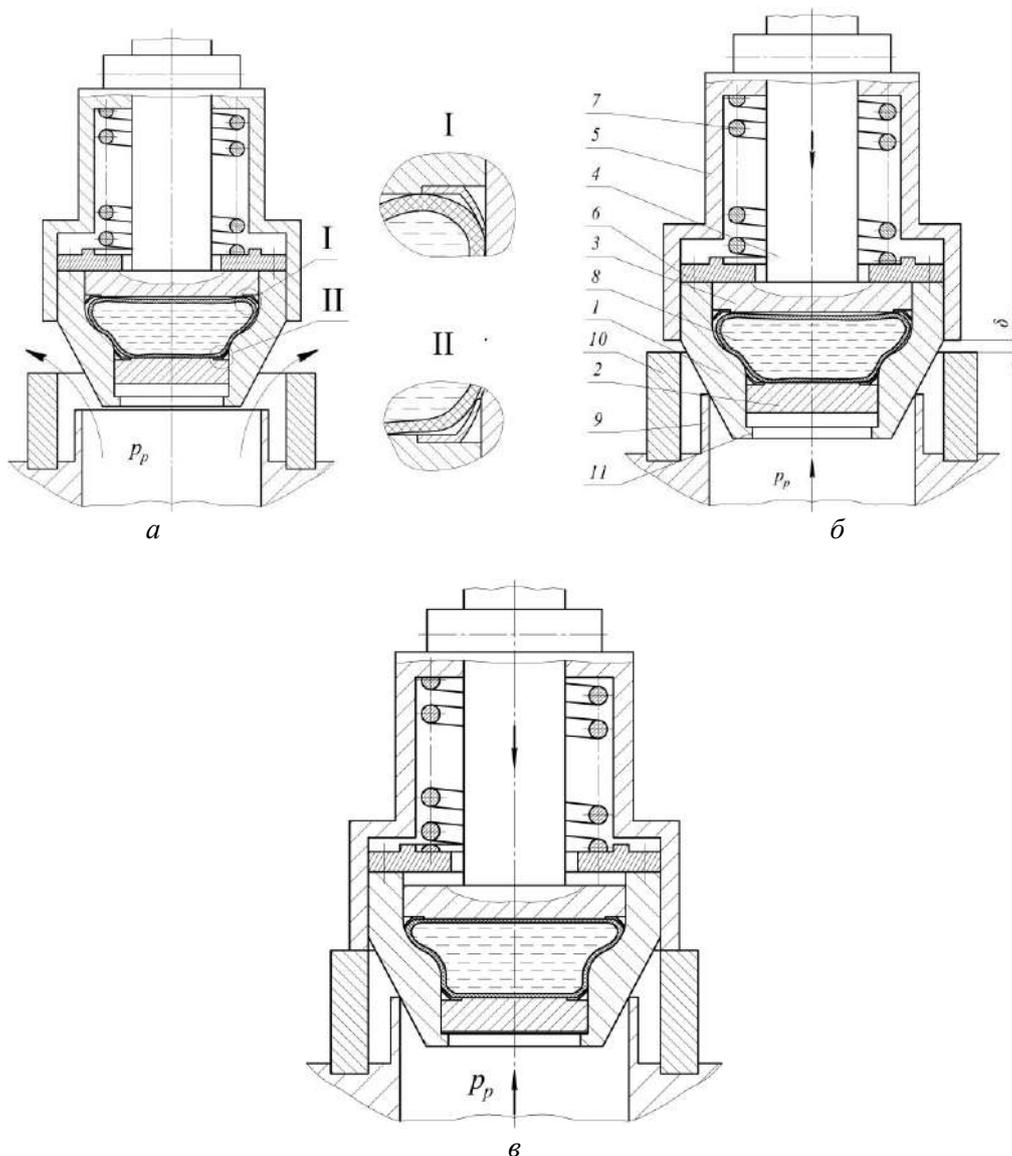


Рис. 6. Конструкция клапана в открытом (а), промежуточном (в момент контакта золотника и седла) (б) и закрытом (в) положениях:  
1 – золотник; 2 – малый поршень; 3 – большой поршень; 4 – шток привода; 5 – ограничитель хода; 6 – стопорная шайба; 7 – пружина; 8 – силиконовый эластомер; 9 – седло; 10 – упор; 11 – ограничитель малого поршня

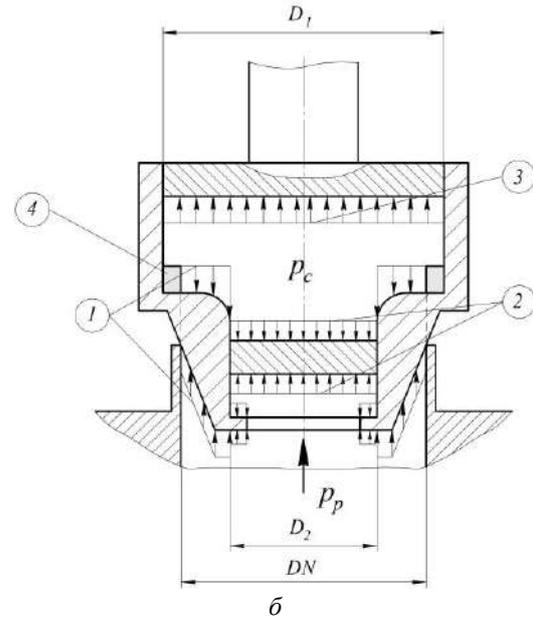
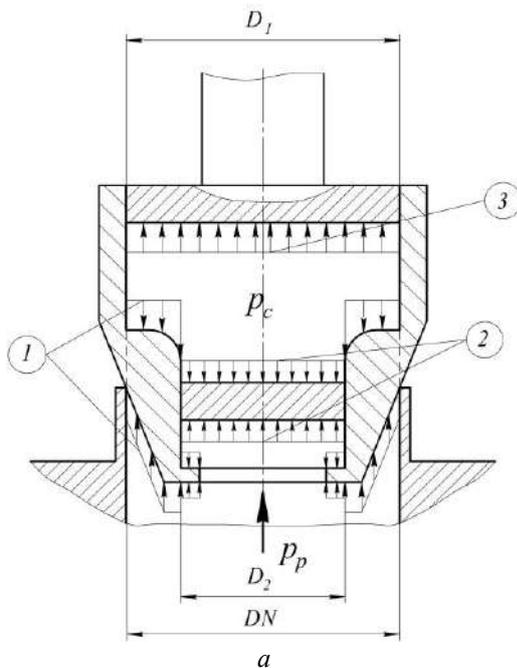
Fig. 6. The design of the valve in the open (a), intermediate (at the time of contact spool and seat) (b) and closed (c) positions:

1 – spool; 2 – small piston; 3 – large piston; 4 – drive rod; 5 – travel stop; 6 – lock washer; 7 – spring; 8 – silicone elastomer; 9 – saddle; 10 – emphasis; 11 – small piston limiter

Предлагаемый клапан работает следующим образом: в ходе перекрытия потока рабочей среды (рис. 6, б), перекрывается зазор между золотником и седлом. При этом между ограничителем и упором сохраняется зазор  $\delta$ . Последующее движение золотника вниз вызовет нагружение седла усилием герметизации. Золотник сместится относительно штока и связанного с ним большого поршня. При этом малый поршень опустится, а большой поршень отойдет от упорной накладки.

Давление рабочей среды передается через малый поршень и эластичный элемент на большой поршень и шток, а также на внутреннюю поверхность золотника.

На рис. 7 изображена схема (остальные части конструкции клапана не показаны) распределения осевого давления рабочей среды по внутренней и наружной поверхности золотника клапана. Неразгруженная поверхность  $D_n$  соответствует диаметру условного прохода  $DN$ , а разгруженная  $D_p$  зависит от внутреннего диаметра золотника. Давление, создаваемое рабочей средой на внешнюю поверхность малого поршня ( $D_2$ ) и передаваемое силиконовым эластомером на внутреннюю поверхность золотника, компенсируется посредством того же давления (рис. 7, область 1 и 2). Давление в области 3 действует на поверхность большого поршня ( $D_1$ ), передается на шток и привод клапана и не влияет на разгрузку затвора.



**Рис. 7.** Распределение осевого давления при разгрузке клапана:

*a* – полная разгрузка ( $DN = D_n = D_p$ );  
*б* – самоуплотнение ( $DN = D_n$ ;  $D_p > DN$ )

**Fig. 7.** Distribution of axial pressure when unloading the valve:

*a* – full unloading ( $DN = D_n = D_p$ );  
*б* – self-sealing ( $DN = D_n$ ;  $D_p > DN$ )

В случае, если диаметр условного прохода  $DN$  меньше диаметра большого поршня  $D_2$ , возникает избыточное давление на внутренней поверхности золотника и тогда  $D_p$  становится больше чем  $D_n = DN$  (область 4).

Таким образом, подбирая диаметр большого поршня  $D_2$  в зависимости от  $DN$ , можно обеспечить либо разгрузку затвора клапана (рис. 7, *a*), либо его самоуплотнение (рис. 7, *б*).

Для повышения надежности эластичного элемента, между малым и большим поршнями предлагается установить тонкостенные металлические элементы (см. рис. 4).

Усилие, создаваемое со стороны привода в предлагаемой конструкции (см. рис. 6) определяется из выражения:

$$F_{\text{пр}} = q_{\text{гер}} \cdot \pi \cdot DN + \frac{\pi(D_n - D_p)^2}{4} \cdot p_p + F_{\text{тр}},$$

где  $q_{\text{гер}}$  – герметизирующая нагрузка в месте контакта золотника с седлом, Н/мм;  $DN$  – диаметр условного прохода, мм;  $p_p$  – давление рабочей среды, МПа;  $D_n$  – характерные размеры неразгруженной части золотника, мм;  $D_p$  – ха-

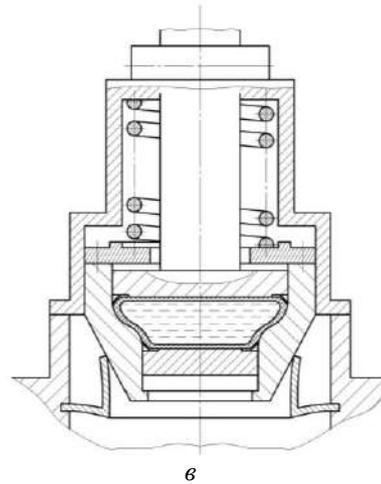
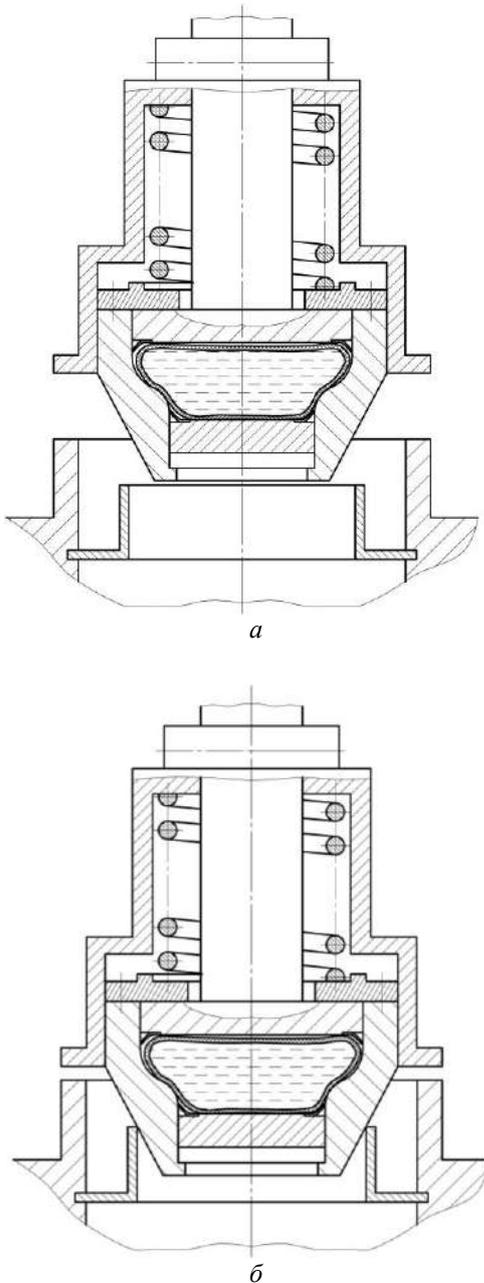
ракетные размеры разгруженной части золотника, мм;  $F_{тр}$  – сила трения, Н.

Исключая составляющую  $p_p$  при полной разгрузке ( $D_H = D_p$ ), получаем

$$F_{пр} = q_{ГЕР} \cdot \pi \cdot DN + F_{тр}$$

Значение  $q_{ГЕР}$  может быть минимизировано за счет снижения приведенной жесткости тонкостенной оболочки [13–20].

На рис. 8 представлена перспективная конструкция разгруженного затвора с тонкостенной оболочкой пониженной жесткости.

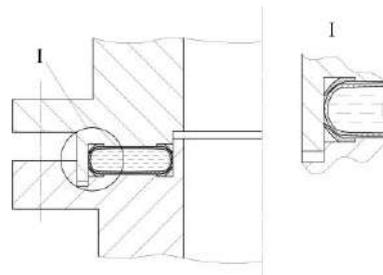


**Рис. 8.** Разгруженный клапан с седлом пониженной жесткости в закрытом (а), промежуточном (в момент контакта золотника и седла) (б) и закрытом (в) положениях

**Fig. 8.** Seat Balanced Valve reduced rigidity in the closed (a), intermediate (at the moment of contact between the spool and seat) (b) and closed (c) positions

Предлагаемая конструкция клапана обеспечивает высокую степень надежности и герметичности соединения при наименьших силовых затратах со стороны привода.

Предлагаемый способ обеспечения герметичности во вторичном уплотнении может быть также применен во фланцевых соединениях (рис. 9).



**Рис. 9.** Фланцевое соединение  
**Fig. 9.** Flange connection

Вторичное уплотнение в виде тонкостенного металлического элемента позволяет компенсировать неточности при монтаже и сборке уплотнительного соединения.

Результаты исследований [9] показали, что значение нагрузки, которую выдерживает силиконовый эластомер больше при установке предлагаемых тонкостенных металлических элементов.

## Заключение

Разгрузка золотника клапана позволяет снизить усилие привода (возможно применение мембранных приводов), снизить энергию соударения элементов затвора, уменьшить массогабаритные характеристики, повысить быстродействие срабатывания, увеличить плавность и точность регулирования, увеличить ресурс как самого уплотнения, так и привода (за счет работы в более щадящем режиме).

Предложенная конструкция разгруженного клапана с вторичными уплотнениями в

виде тонкостенных элементов и седлом пониженной жесткости обеспечивает:

- минимизацию массогабаритных параметров конструкции;
- необходимую степень прижатия тонкостенных элементов, зависящую от давления рабочей среды и жесткости приводной части;
- компенсацию конструктивных неточностей при монтаже и сборке;
- выбор отклонения формы седла при посадке золотника;
- работу клапана в условиях высоких давлений, температур и различного состава герметизируемой среды.

## Список литературы

1. Кондаков Л.А. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер, В.В. Гордеев, Б.А. Фурманов, Б.В. Кармугин / под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.
2. Гуревич Д.Ф. Трубопроводная арматура. Л.: Машиностроение, 1981. 386 с.
3. Кармугин Б.В., Стратиневский Г.Г., Мендельсон Д.А. Клапанные уплотнения пневмогидроагрегатов. М.: Машиностроение, 1983. 152 с.
4. Шпаков О.Н. Азбука трубопроводной арматуры: справ. пособие. СПб.: Питер, 2003. 218 с.
5. 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: Изд-во ИрГУПС, 2012. С. 124–128.
6. Гошко А.И. Арматура трубопроводная целевого назначения. Кн. 1: Выбор. Эксплуатация. Ремонт. М.: Машиностроение, 2003. 427 с.
7. ГОСТ Р 52720–2007. Арматура трубопроводная. Термины и определения. Введ. 2007–04–11. М.: Стандартинформ, 2007. 16 с.
8. Results of the complex studies of microstructural, physical and mechanical properties of engineering materials using innovative methods / V.I. Shastin, S.K. Kargapol'tsev, V.E. Gozbenko et al. // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. № 12 (24). P. 15269–15272.
9. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Обзор способов разгрузки золотника клапана от давления герметизируемой среды // Системы. Методы. Технологии. Братск: Изд-во БрГУ, 2010. № 3 (7). С. 30–36.
10. Герасимов С.В., Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Математическая модель динамического нагружения двухседельного клапана // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. Братск: Изд-во БрГУ, 2012. С. 126–129.
11. Пат. 2516994 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> F 16 K 39/02. Разгруженный клапан / Белоголов Ю.И., Долотов А.М., Огар П.М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения». № 2012150424/06; заявл. 27.11.2012; опубл. 27.05.2014. 4 с.: ил.
12. Белоголов Ю.И. Совершенствование конструкций уплотнительных соединений с тонкостенными элементами (упругой кромкой). автореферат дис. ... кандидата технических наук / Брат. гос. ун-т. Братск, 2013.
13. Долотов А.М. Основы теории и проектирования уплотнений пневмогидроарматуры летательных аппаратов: Учебное пособие / А.М. Долотов, П.М. Огар, Д.Е. Чегодаев. М.: Изд-во МАИ, 2000. 296 с. ISBN 5-7035-2307-9.
14. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Определение перемещений в оболочечно-пластинчатом седле клапана // Системы. Методы. Технологии. Братск: Изд-во БрГУ, 2013. № 2 (18). С. 22–28.
15. Герасимов С.В., Долотов А.М., Белоголов Ю.И., Саакян К.Г. Расчет седла уплотнительного соединения, нагруженного затвором и давлением герметизируемой среды // Механика XXI века: материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Братск: Изд-во БрГУ, 2012. № 11. С. 106–111.
16. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Определение жесткостных характеристик оболочечно-пластинчатого седла клапана. Трубопроводный транспорт: теория и практика. М.: ОАО ВНИИСТ, 2013. № 3 (37). С. 32–37.
17. Долотов А.М., Зацарный В.А. Расчет жесткости упругих затворов // Вестник Львов, политехн. ин-та № 180. Львов: Вища школа, 1983.
18. Долотов А.М. Пути совершенствования клапанных уплотнительных соединений с оболочечными седлами / А.М. Долотов, Ю.И. Белоголов // Енерго та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування: Матеріали 4-ої міжвузівської науково-технічної конференції викладачів, молодих вчених та студентів. Донецьк: 2012. С. 87–88.
19. Долотов А.М., Гозбенко В.Е., Белоголов Ю.И. Уплотнительные соединения с использованием тонкостенных элементов. Депонированная рукопись № 508-B2011 22.11.2011.
20. Елисеев С.В., Банина Н.В., Ахмадеева А.А., Гозбенко В.Е. Математические модели и анализ динамических свойств механических систем. Депонированная рукопись № 782-B2009 08.12.2009.

## References

1. Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B., Gordeyev V.V., Furmanov B.A., Karmugin B.V. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: Spravochnik [Seals and sealing technology: Handbook]. M.: Mashinostroyeniye, 1986. 464 p.
2. Gurevich D.F. Truboprovodnaya armatura [Pipeline accessories]. L.: Mashinostroyeniye, 1981. 386 p.
3. Karmugin B.V., Stratinevskiy G.G., Mendel'son D.A. Klapannyye uplotneniya pnevmogidroagregatov. M.: Mashinostroyeniye, 1983. 152 p.
4. Shpakov O.N. Azbuka truboprovodnoy armatury: sprav. posobiye [ABC of pipeline fittings: ref. allowance]. SPb.: P, 2003. 218 p.
5. Belogolov Yu.I. Kompensatsiya usilii, deystvuyushchikh na zatvor so storony germetiziruyemoy sredy [Compensation of efforts acting on the shutter from the side of the sealed environment]. *Problemy transporta Vostochnoy Sibiri: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Problems of transport in Eastern Siberia: materials of the All-Russian scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2012. pp. 124–128.
6. Goshko A.I. Armatura truboprovodnaya tselevogo naznacheniya. Kn. 1: Vybor. Eksploatatsiya. Remont [Pipeline fittings for special purposes. Book. 1: Choice. Exploitation. Repair]. M.: Mashinostroyeniye, 2003. 427 p.
7. GOST R 52720–2007. Armatura truboprovodnaya. Terminy i opredeleniya [GOST R 52720-2007. Pipe fittings. Terms and Definitions]. Vved. 2007–04–11. M.: Standartin-form, 2007. 16 p.
8. Shastin V.I., Kargapoltcev S.K., Gozbenko V.E. et al. Results of the complex studies of microstructural, physical and mechanical properties of engineering materials using in-novative methods. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. № 12 (24). pp. 15269–15272.
9. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Obzor sposobov razgruzki zolotnika klapana ot davleniya germetiziruyemoy sredy [Review of methods for unloading the valve spool from the pressure of the sealed medium]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technology]. Bratsk: BrGU Publ., 2010. № 3 (7). pp. 30–36.
10. Gerasimov S.V., Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Matematicheskaya model' dinamicheskogo nagruzheniya dvukhsedel'nogo klapana [Mathematical model of dynamic loading of a two-seat valve]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i inzhenernyye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences]. Bratsk: BrGU Publ., 2012. pp. 126–129.
11. Pat. 2516994 Rossiyskaya Federatsiya, MPK6 F 16 K 39/02. Razgruzhennyy klapen [Unloaded valve] / Belogolov Yu.I., Dolotov A.M., Ogar P.M.; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO «Irkutskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya». № 2012150424/06; zayavl. 27.11.2012; opubl. 27.05.2014. 4 p.: il.
12. Belogolov Yu.I. Sovershenstvovaniye konstruksiy uplotnitel'nykh soyedineniy s tonkostennymi elementami (uprugoy kromkoy): avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of the designs of sealing joints with thin-walled elements (elastic edge): author. Ph.D. (Engineering) diss.]. Bratsk, 2013. 9 p.
13. Dolotov A.M., Ogar P.M., Chegodayev D.Ye. Osnovy teorii i proyektirovaniya uplotneniy pnevmogidroarmatury letatel'nykh apparatov: Uchebnoye posobiye [Fundamentals of the theory and design of seals for pneumatic hydraulic fittings of aircraft: Textbook]. M.: MAI Publ., 2000. 296 p. ISBN 5-7035-2307-9.
14. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Opredeleniye peremeshcheniy v obolochenchno-plastinchatom sedle klapana [Determination of displacements in a shell-lamellar valve seat]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technology]. Bratsk: BrGU Publ., 2013. № 2 (18). pp. 22–28.
15. Gerasimov S.V., Dolotov A.M., Belogolov Yu.I., Saakyan K.G. Raschet sedla uplotnitel'nogo soyedineniya, nagruzhennogo zatvorom i davleniyem germetiziruyemoy sredy [Calculation of the saddle of the sealing joint, loaded with the shutter and the pressure of the sealed environment]. *Mekhaniki XXI veku: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Mechanics of the 21st century: materials of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists, graduate students and students]. Bratsk: BrGU Publ., 2012. № 11. pp. 106–111.
16. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Opredeleniye zhestkostnykh kharakteristik obolochenchno-plastinchatogo sedla klapana [Determination of the stiffness characteristics of a shell-plate valve seat]. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika* [Pipeline transport: theory and practice]. M.: OAO VNIIST, 2013. № 3 (37). pp. 32–37.
17. Dolotov A.M. Zatsarnyy V.A. Raschet zhestkosti uprugikh zatvorov [Calculation of the stiffness of elastic locks]. *Vestnik L'vov. politekhn. in-ta* [Bulletin of the Lviv Polytechnic Institute]. L'vov: Vishcha shkola, 1983. No. 180.
18. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Puti sovershenstvovaniya klapannykh uplotnitel'nykh soyedineniy s obolochenchnymi sedlami [Ways of improving valve sealing connections with shell seats]. *Yenergo ta resursozberigayuchi tekhnologii pri yekspluatatsii mashin ta ustatkuvannya: materiali 4-oï mizhvuziv's'koï naukovo-tekhnichnoï konferentsii vikladachiv, molodikh vchenikh ta studentiv*. Donetsk: 2012. pp. 87–88.
19. Dolotov A.M., Gozbenko V.E., Belogolov Yu.I. Uplotnitel'ny'e soyedineniya s ispol'zovaniem tonkostennykh elementov [Sealing joints using thin-walled elements]. *Deposited manuscript No. 508-In 2011*. 22.11.2011.
20. Eliseev S.V., Bunina N.V., Akhmadeeva A.A., Gozbenko V.E. Matematicheskie modeli i analiz dinamicheskikh svoystv mexanicheskikh sistem [Mathematical models and analysis of dynamic properties of mechanical systems]. *Deposited manuscript No. 782-In 2009*. 08.12.2009.

## Информация об авторах

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

## Information about the authors

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

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ТРАНСПОРТ**

**TRANSPORT**

## Методика испытания образцов из эластомеров для получения механических характеристик их гиперупругости и конечно-элементного моделирования деформируемых сборных конструкций

Д. А. Михайлов<sup>1</sup>, А. А. Пыхалов<sup>1,2</sup>✉, Е. В. Зеньков<sup>1,2</sup>, А. И. Артюнин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ pykhalov\_aa@mail.ru

### Резюме

В работе рассматриваются механические характеристики изделий из эластомеров, в том числе резины, имеющих широкую область применения. Исследование напряженно-деформированного состояния этих изделий является актуальным и ему посвящено большое количество работ. Актуальность темы определяется тем, что остаются вопросы изучения крепления эластомеров, т. е. их работы в условиях сопряжения с деталями из металлов. Развитие подходов решения этой нелинейной задачи имеет особое значение в таких отраслях, как авиация, энергетика, машиностроение и других высокотехнологичных производствах. В этом случае к эластомерам предъявляются высокие требования в связи с широким диапазоном температур и перегрузок на всех этапах жизненного цикла изделия. В частности, к особым требованиям к эластомерам относятся: эластичность, механические характеристики и стойкость к различным агрессивным средам. В статье представлено экспериментальное исследование эластомеров относительно стандартных и нестандартных условий эксплуатации, а также перечень узлов, имеющих перспективные решения с использованием эластомерных материалов. Поведение металлов хорошо изучено и существует множество источников информации об их механических свойствах, в то время как жесткостные характеристики эластомерных материалов в открытом доступе отсутствуют. В данном исследовании предлагаются диаграммы растяжения материала, также здесь отражен порядок действий, с помощью которых осуществляется получение механических характеристик эластомера, и показаны результаты проведения натурных испытаний и конечно-элементного моделирования. Испытания, проведенные на использованном оборудовании в соответствии с ГОСТ 270-75, обеспечивают получение корректных механических характеристик эластомерного материала с помощью утилиты Experimental Data Fitting.

### Ключевые слова

авиация, эластомерные материалы, упругопрочностные свойства резины, потенциал энергии деформации, натурные испытания, конечно-элементное моделирование

### Для цитирования

Михайлов Д. А. Методика испытания образцов из эластомеров для получения механических характеристик их гиперупругости и конечно-элементного моделирования деформируемых сборных конструкций / Д. А. Михайлов, А. А. Пыхалов, Е. В. Зеньков, А. И. Артюнин. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 38–47. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).38-47

### Информация о статье

поступила в редакцию: 09.09.2021, поступила после рецензирования: 17.09.2021, принята к публикации: 10.10.2021

## Technique for testing samples from elastomers to obtain the mechanical characteristics of their hyperelasticity and finite element modeling of deformable assembly structures

D. A. Mikhailov<sup>1</sup>, A. A. Pykhalov<sup>1,2</sup>✉, E. V. Zen'kov<sup>1,2</sup>, A. I. Artyunin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ pykhalov\_aa@mail.ru

### Abstract

Products made of elastomers, including rubber, have a wide field of application, and at present a large number of works are devoted to the study of their stress-strain state. However, questions remain when studying their collaboration with parts from other materials in contact with them. These issues are of particular relevance in aviation, in particular, due to the high density of the arrangement of complex mechanisms, the diversity of parts, etc. Also, high requirements for aviation elastomers are imposed in connection with a wide range of temperatures and overloads during operation. products. These requirements include: preservation of elastic properties, physical and mechanical properties, resistance to various aggressive environments. This paper presents a list

of components of various aircraft systems manufactured using rubber. The paper presents the study of the mechanical characteristics of products made of elastomers, including rubber, which have a wide range of applications. The study of the stress-strain state of these products is relevant and a large number of works are devoted to it. The relevance of the presented work is determined by the fact that there remain questions of studying the fastening of elastomers, that is, their work in conditions of conjugation with metal parts. The development of approaches to solving this nonlinear problem is of particular relevance in such industries as aviation, energy, mechanical engineering and other high-tech industries. In this case, high requirements are imposed on elastomers due to a wide range of temperatures and overloads at all stages of the product life cycle. In particular, the special requirements for elastomers include: elasticity, mechanical characteristics and resistance to various aggressive media. This paper presents an experimental study of elastomers relative to standard and non-standard conditions, as well as a list of nodes that have promising solutions using elastomeric materials.

### Keywords

aviation, elastomeric materials, determination of elastic strength properties of rubber, strain energy potential, full-scale tests, finite element modeling

### For citation

Mikhailov D. A., Pykhlov A. A., Zen'kov E. V., Artyunin A. I. Metodika ispytaniya obraztsov iz ehlastomerov dlya polucheniya mekhanicheskikh kharakteristik ikh giperuprugosti i konechno- ehlementnogo modelirovaniya deformiruemykh sbornykh konstruksij [Technique for testing samples from elastomers to obtain the mechanical characteristics of their hyperelasticity and finite element modeling of deformable assembly structures]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 38–47. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).38-47

### Article Info

Received: 09.09.2021, Revised: 17.09.2021, Accepted: 10.10.2021

### Введение

Изделия из эластомеров, в том числе резины, имеют широкую область применения, и в настоящее время исследованию их напряженно-деформированного состояния посвящено большое количество работ. Однако остаются вопросы при изучении их совместной работы с деталями из других материалов, находящихся с ними в контакте. Особую актуальность эти вопросы имеют в авиации в связи с высокой плотностью компоновки сложных механизмов, многоменклатурностью деталей и др. Также высокие требования к авиационным эластомерам предъявляются в связи с широким диапазоном температур и перегрузок при эксплуатации изделия. К этим требованиям относятся: сохранение эластических

свойств, физико-механических показателей, стойкость к различным агрессивным средам. В настоящей работе представлен перечень узлов различных систем летательного аппарата (ЛА), произведенных с использованием резины.

При изготовлении деталей и сборке узлов производство опирается на результаты анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) математических моделей тел. Использование метода конечных элементов позволяет определить параметры НДС детали или узла с высокой степенью соответствия результатам натурных испытаний [1]. В машиностроительной отрасли значительную роль играют резинотехнические изделия, выполняющие демпфирующие и герметизирующие функции.



Рис. 1. Фланцевое соединение топливного бака самолета

Fig. 1. Flange connection of aircraft fuel tank

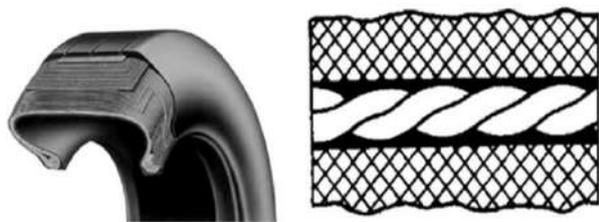
### Применение эластомеров в авиации

Широкое применение в производстве деталей ЛА получили силиконовые резины: они используются в качестве уплотнителей, мембран, профильных деталей для герметизации, выдерживающих действие низких температур в высоких слоях атмосферы, значительных концентраций озона и солнечной радиации [2]. Из них изготавливают различные прокладки, уплотнительные кольца в гидравлических и других жидкостных системах самолета, кожухи антиобледенителей, уплотнители топливных баков и противопожарных перегородок, амортизирующие подушки приборов, амортизаторы, поглощающие удары или вибрации без ослабления прочности связи между резиной и металлическими фланцами детали [3]. На ЛА используется большое количество проводов и кабелей с силиконовой изоляцией. Новейшие резиновые смеси применяются для изготовления герметичных кислородных масок для экипажа.

Фланцевые соединения (рис. 1), обеспечивающие герметичность топливных баков в местах стыков трубопроводов, очень массивные [4], а возможность уменьшения его толщины и рассмотрения задачи совместной работы резины и металла при расширении позволит снизить общую массу.

С этой же целью можно рассмотреть задачи соединений с применением жесткой резины и уменьшить вес агрегатов за счет гидроаккумуляторов и топливных систем с меньшей массой.

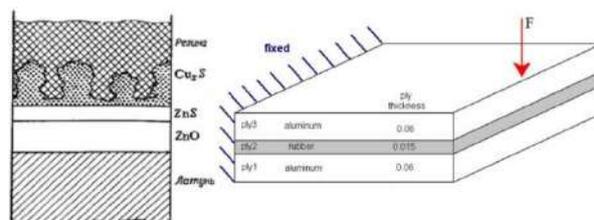
Более детальное изучение соединений металлических нитей брекера с резиновыми наполнителями [5] (рис. 2) позволит выявить недостатки и определить параметры, повышающие срок службы пневматиков, разрушающихся в условиях посадки.



**Рис. 2.** Соединение резины с металлом, полученное в процессе вулканизации

**Fig. 2.** Rubber-to-metal bonding obtained during the vulcanization process

В современном машиностроении такие соединения, а также соединения в эластомерных композитах (рис. 3), осуществляются с помощью латунирования, при котором достигается наибольшая прочность, температуростойкость, вибростойкость и хорошее сопротивление удару [6].

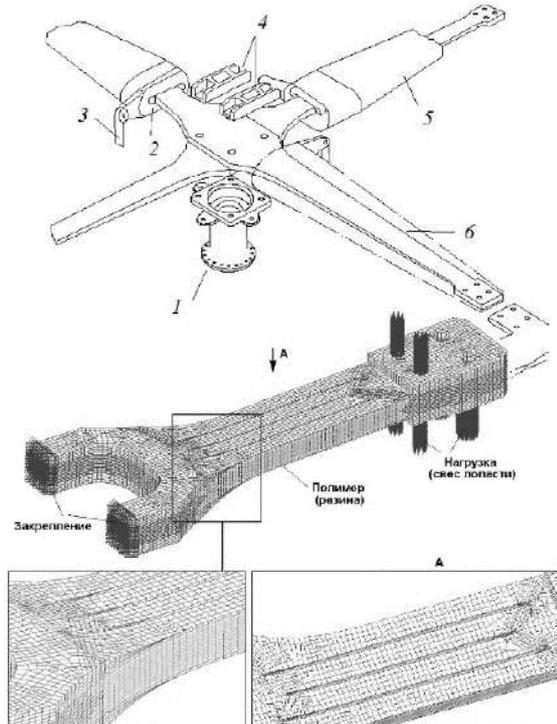


**Рис. 3.** Резинометаллический композит, полученный в процессе вулканизации резины с алюминием с предварительным латунированием металлической поверхности

**Fig. 3.** Rubber-metal composite obtained in the process of vulcanization of rubber with aluminum with preliminary brass plating of the metal

Для чистоты проведения процесса латунирования поверхность металла предварительно обезжиривают растворителем, а затем раствором щелочи путем подвешивания на электрод и пропускания электрического тока через материал. Самая ответственная операция – осаждение латуни. В данном случае анодами являются пластины с 60–70 % содержанием меди и 30–40 % содержанием цинка. Таким образом, вулканизация резины с алюминием производится с предварительным электрическим осаждением латуни на поверхность металла в электролизерах. В процессе нагрева образуется промежуточная пленка, и продукт реакции  $\text{Cu}_x\text{S}$  вырастает в фазу эластомера с множеством точек физического взаимодействия. Недостатком данного метода являются сложности в равномерном осаждении материала на детали сложной конфигурации.

Изучение диссипативных и сцепных свойств резины наряду с ее износостойкостью в совокупности с более высокими механическими характеристиками металлов, таких как модуль упругости и коэффициент Пуассона, позволит создавать композитные конструкции с высоким пределом усталостной прочности. Такие конструкции будут актуальны для торсионов винтов вертолетов [7] (рис. 4).

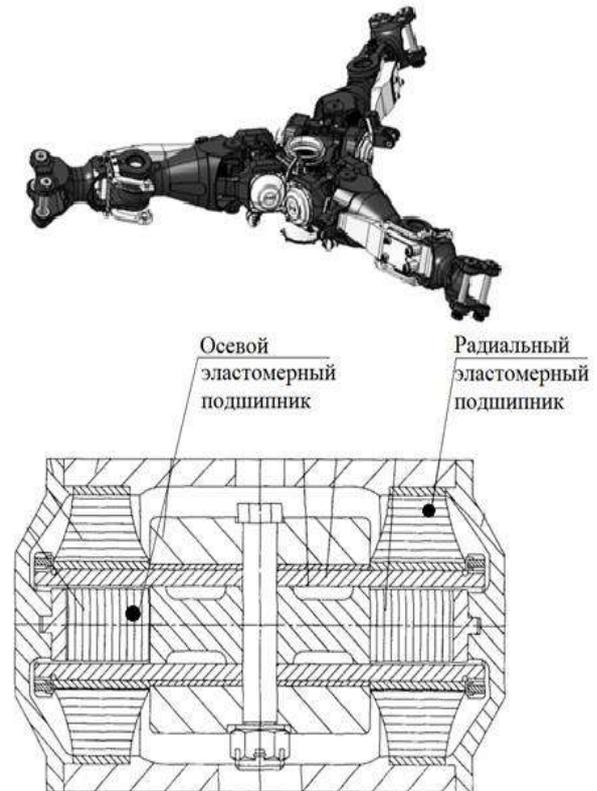


**Рис. 4.** Винт вертолета с эластомерными торсионами:  
1 – втулка; 2 – центрирующая сферическая опора; 3 – поводок управления шагом лопасти; 4 – кронштейны крепления; 5 – кожух; 6 – упругий торсион

**Fig. 4.** Helicopter propeller with elastomeric torsion bars:  
1 – bushing; 2 – centering spherical bearing;  
3 – leash for controlling the blade pitch;  
4 – mounting brackets; 5 – casing;  
6 – elastic torsion bar

Здесь втулка несущего винта в своей конструкции имеет упругий торсион балочного типа из полимера (резины), который воспринимает центробежную силу и заменяет шарниры, тем самым обеспечивая необходимые перемещения лопастей за счет собственной податливости, и выполняет функции осевого, вертикального и горизонтального шарниров.

Важнейшее преимущество эластомеров – возможность создания из них элементов конструкции с заранее заданными свойствами, наиболее полно соответствующими характеру и условиям работы торсиона в составе втулки несущего винта [8]. Альтернативным вариантом данной сборочной единицы является трехшарнирная втулка с эластомерными подшипниками (рис. 5).



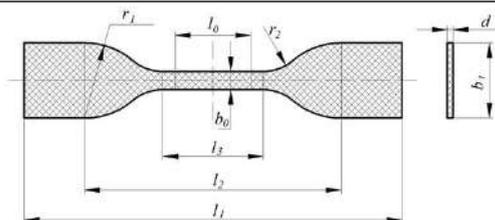
**Рис. 5.** Трехшарнирная втулка с эластомерными подшипниками в шарнирах  
**Fig. 5.** 3-pivot sleeve with elastomeric bearings in joints

Данная конструкция исключает необходимость применения торсионов, сокращает время на техническое обслуживание, увеличивает надежность конструкции. Здесь отсутствие трущихся деталей уменьшает износ узлов, что повышает надежность и ресурс конструкции [9].

При проведении математического моделирования указанных конструкций, контактное взаимодействие частей которых описано в работе [10], появляются проблемы на этапе задания механических характеристик эластомерных материалов ввиду отсутствия информации об их жесткостных характеристиках в открытом доступе. Для их получения предлагается получить диаграммы растяжения материала.

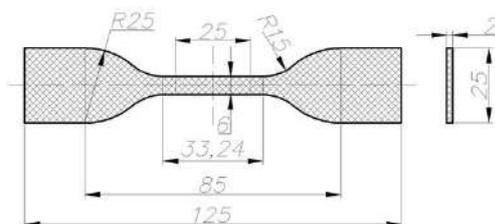
#### Применяемые материалы и оборудование

В качестве образца используется лопатка с размерами, регламентированными ГОСТ 270-75 (рис. 6), изготовленная из технической резины [11].



**Рис. 6.** Размеры лопатки по ГОСТ 270-75  
**Fig. 6.** Blade dimensions in accordance with GOST 270-75

На рис. 7 показан выбранный образец для проведения испытаний.



**Рис. 7.** Образец № 1 по ГОСТ 270-75  
**Fig. 7.** Sample № 1 in accordance with GOST 270-75

В качестве используемого оборудования в испытании будет применена установка INSTRON 5982, характеристики которой сведены в табл. 1. На рис. 8 показан общий вид установки и вид с установленным образцом.



**Рис. 8.** Универсальная электромеханическая испытательная машина INSTRON 5982  
**Fig. 8.** Universal electromechanical testing machine INSTRON 5982

Данная машина обеспечивает надежное закрепление образца по установочным меткам и измерение силы при заданных удлинениях.

**Таблица 1.** Характеристики машины INSTRON 5982  
**Table 1.** Characteristics of the INSTRON 5982 machine

Параметр	Показатель
Статическая нагрузка	до 100 кН
Разрешение сервопривода по перемещению	0,08 мкм
Точность измерения перемещения	± 0,05 % от измеряемой величины
Скорость испытания	0,005–1016 мм/мин
Точность скорости привода	± 0,05 % от установленной

### Процесс проведения испытаний

Согласно ГОСТ 270-75, испытания необходимо проводить со скоростью растяжения 500 мм/мин и при температуре  $23 \pm 2$  °С. Три образца, разрушенные вследствие растяжения с указанными параметрами, показали практически идентичные результаты (рис. 9).

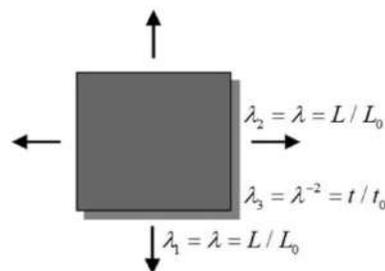
При испытаниях было выявлено, что скорость растяжения оказывает существенное влияние на предел прочности [12] (рис. 10).

### Основа программного комплекса

В теории тонких оболочек для несжимаемого материала, такого как резина, зависимость напряжения от деформации определяется согласно закону упругости [13]:

$$\sigma_i = \lambda_i \cdot \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} - \lambda_3 \cdot \frac{\partial W}{\partial \lambda_3},$$

где  $W$  – потенциал энергии деформации, зависящий от главных кратностей удлинений  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  (рис. 11), и углов, определяющих направление главных осей тензора кратностей удлинений  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  зависимость между которыми определяется разными моделями материала.



**Рис. 11.** Главные относительные удлинения (кратности) на примере двухосного растяжения  
**Fig. 11.** Principal elongations (folds) by the example of 2-axial tension

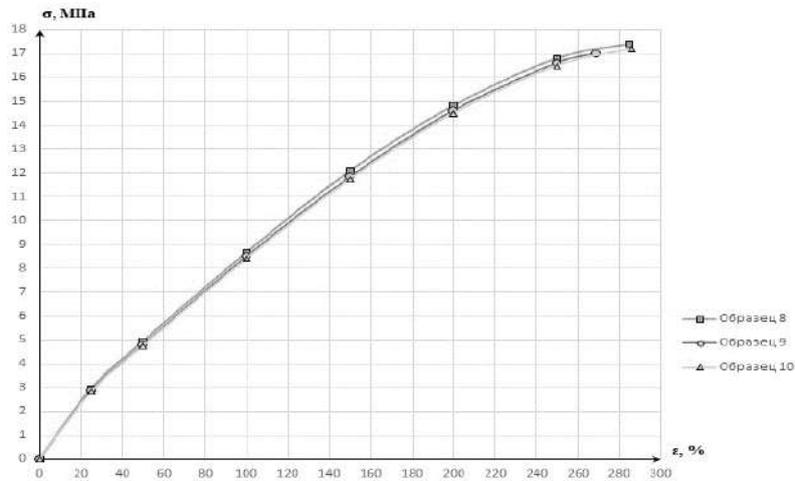
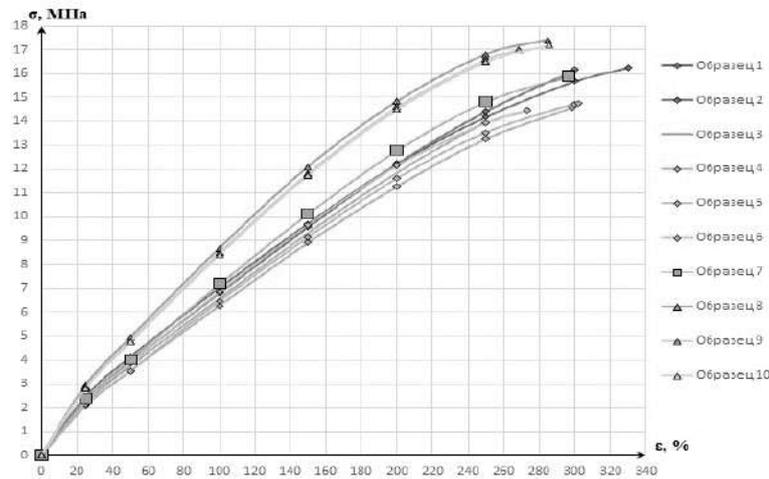


Рис. 9. Диаграмма растяжения образцов № 8, 9 и 10 со скоростью 500 мм/мин.  
Fig. 9. Tension diagram for specimens No. 8, 9 and 10 at a speed of 500 mm/min.



$V_{1, 2, 3, 4, 5, 6} = 50$  мм/мин;  $V_7 = 100$  мм/мин;  $V_{8, 9, 10} = 500$  мм/мин (ГОСТ)

Рис. 10. Сравнение диаграмм растяжения образцов с различной скоростью растяжения  
Fig. 10. Comparison of tensile diagrams for specimens with different tensile rates

В применяемых моделях материала для упрощения их вида указанные удлинения используются в виде трех инвариантов деформации  $I$  [14]:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \\ I_2 &= \lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\lambda_3, \\ I_3 &= \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2. \end{aligned} \quad (1)$$

С помощью кратностей удлинений возможно вычисление относительного изменения объема (эластичной объемной деформации)  $J$ :

$$J = J_{el} = \frac{V}{V_0} = \lambda_1\lambda_2\lambda_3.$$

При чистом сдвиге используется понятие девиаторных деформаций, инварианты которых вычисляются [14]:

$$\bar{I}_i = \frac{I_i}{\sqrt[3]{J^2}},$$

где  $i = 1, 2, 3$  (см. уравнения (1)). Общий вариант записи потенциала энергии деформации  $W$  называется полиномиальной моделью материала:

$$W = \sum_{i+j}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J_{el} - 1)^{2k},$$

где  $C_{ij}$ ,  $N$ ,  $d_k$  – константы гиперупругого материала, определяемые для каждой модели экспериментальным путем [15].

Одной из наиболее распространенных видов потенциала энергии деформации – двух-параметрическая модель Муни – Ривлина [16]:

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d_k}(J_{el} - 1)^2,$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio);  $K_0$  – начальный объемный модуль (Bulk Modulus);  $d_k$  – параметр сжимаемости материала:

$$d_k = \frac{1 - 2\nu}{C_{10} + C_{01}} = \frac{2}{K_0}.$$

### Обработка полученных результатов

Результаты испытаний (рис. 8) необходимо занести в таблицу и сохранить в формате .csv (табл. 2).

**Таблица 2.** Результаты испытаний, занесенные в Excel и сохраненные в формате .csv  
**Table 2.** Test results recorded in Excel and saved in .csv format

$\varepsilon$	0	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	2,6855
$\sigma$	0	1,612	2,705	4,8	6,684	8,256	9,383	9,603

В результате обработки утилитой Experimental Data Fitting [17] данных получены коэффициенты жесткости  $C_{10} = 1,4307944$  и  $C_{01} = -0,15372042$  (рис. 12).



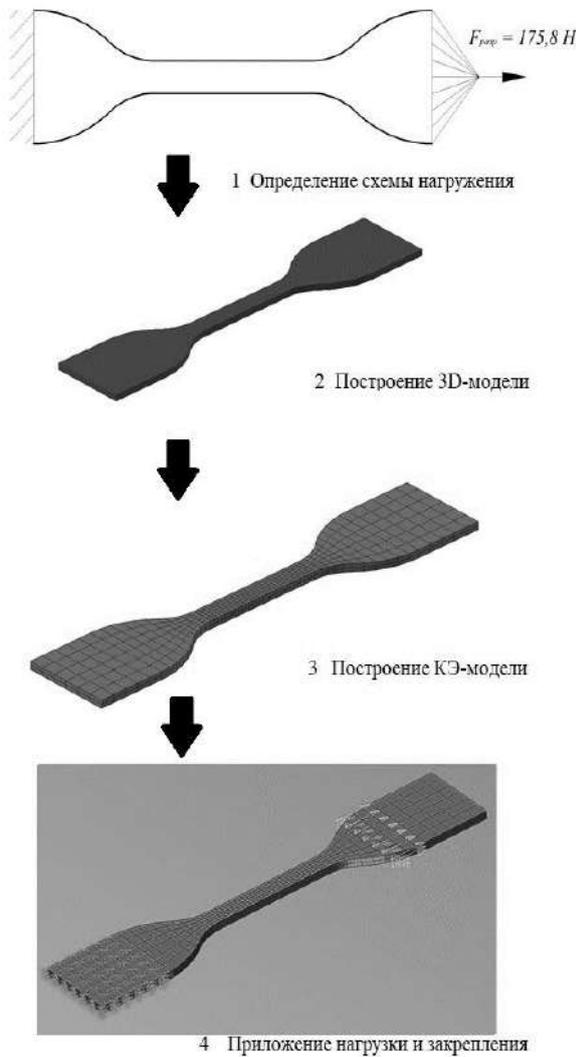
**Рис. 12.** Задание исходных данных для расчета жесткостных характеристик материала образца  
**Fig. 12.** Setting the initial data for the calculation stiffness characteristics of the sample material

После добавления в окно обработки информации таблицы с данными растяжения материала и ее привязки к типу проведенного испытания появляется окно с запросом на вычисление свойств (рис. 13).



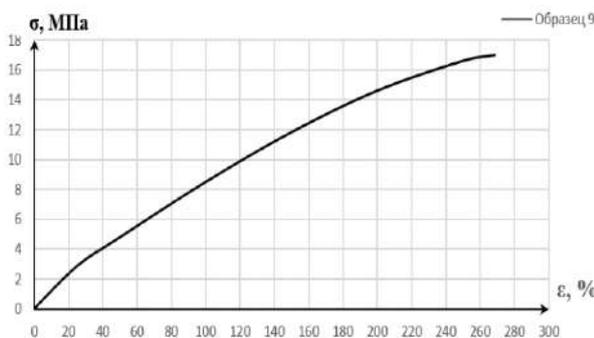
**Рис. 13.** Построение модели Полимерного резиноподобного материала с помощью инструмента MSC.Software Patran Experimental Data Fitting  
**Fig. 13.** Building a model of a polymer rubber-like material using the MSC. Software Patran Experimental Data Fitting tool

Для верификации результатов и дальнейшего использования полученных данных необходимо произвести расчет с применением конечно-элементного моделирования растяжения образца, изготовленного из материала с полученными механическими характеристиками. Подготовка модели к расчету показана на рис. 14.

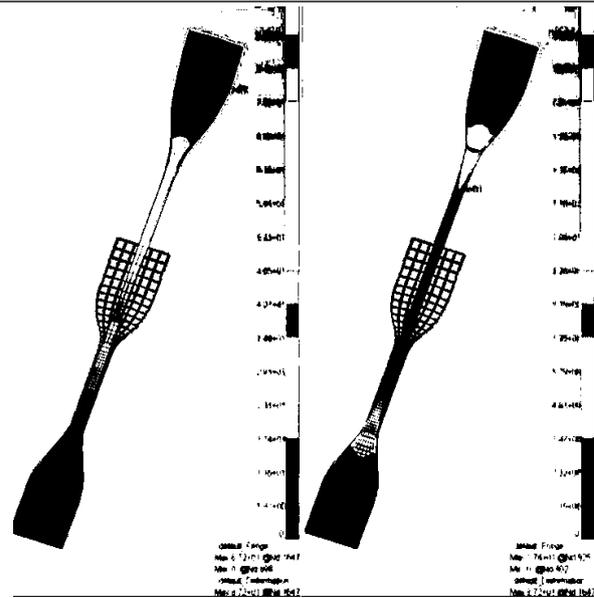


**Рис. 14.** Подготовка модели к расчету  
**Fig. 14.** Preparing the model for calculation

На рис. 15 и 16 изображены результаты натурных испытаний и конечно-элементного моделирования.



**Рис. 15.** Результаты натурных испытаний  
**Fig. 15.** Field test results



**Рис. 16.** Результаты конечно-элементного моделирования  
**Fig. 16.** FE-simulation results

При натурных испытаниях разрушение образца № 9 произошло при  $\Delta l = 87,2$  мм,  $F = 175,8$  Н,  $\sigma_{\max} = 16,99$  МПа. При конечно-элементном моделировании в ПО MSC.Patran с использованием Marc при достижении образцом с характеристиками  $C_{10} = 1,4307944$  и  $C_{01} = -0,15372042$  перемещения в 87,2 мм материал испытал напряжение в 17,4 МПа. Погрешность составила приблизительно 2,5 %, что говорит о наличии внутренних дефектов и неточности при изготовлении образца.

### Заключение

После проведения испытаний выявлены следующие особенности работы эластомеров:

- кривые растяжения носят явно нелинейный геометрический характер;
- резина имеет предельное значение и разрывается при определенной величине напряжения;

– характер кривой зависит от скорости деформирования, поэтому этот фактор учитывается ГОСТ 270-75 и закладывается в конечно-элементной модели;

– проведение испытаний на использованном оборудовании в соответствии с ГОСТ 270-75 обеспечивает получение корректных механических характеристик эластомерного материала с помощью утилиты Experimental Data Fitting.

В связи с этим остается актуальным изучение работы эластомеров в условиях сопряжения с металлическими деталями и их крепления с учетом скорости нагружения. Дополнительно

предполагается изучение влияния латунирования, а также работы демпфирования по математическим моделям, описанным в источнике [18].

### Список литературы

1. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. Москва: Издательство «Мир», 1975 г. 541 с.
2. Пономарев П.В. Разработка силиконовых резин и герметиков с повышенной термо-, огнестойкостью: специальность 05.17.06 «Технология и переработка полимеров и композитов»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пономарев Павел Владимирович: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2019. 124 с.
3. Аверко-Антонович Ю.О., Омельченко Р.Я., Охотина Н.А., Эбич Ю.Р. Технология резиновых изделий. Ленинград: Химия, 1991. 351 с.
4. Голубев А.И., Кондаков Л.А., Овандер В.Б., Гордеев В.В., Фурманов Б.А., Кармугин Б.В. Уплотнения и уплотнительная техника. М.: Машиностроение, 1986. 234 с.
5. Жеребков С.К. Крепление резины к металлам. М.: Госхимиздат. Москва, 1966. 348 с.
6. Смекни. URL: <https://smekni.com/a/172400/kreplenie-reziny-k-metallam/>. Режим доступа: свободный. Текст. Изображение: электронные.
7. Бурцев Б.Н., Вагис В.П., Селеменов С.В. Соосный несущий винт вертолета. Конструкция и аэромеханика. М.: Фирма «Камов», 2004 г., 30 с.
8. Башаров Е.А., Ткаченко С.А. Конструкция втулок винтов вертолета. М.: МАИ, 2019. 104 с.
9. Вагин А.Ю., Михеев С.В., Плущевский А.М., Осмоловский Р.Ф. Несущий винт винтокрылого летательного аппарата с системой складывания лопастей. Патент № 2376201 С2 Российская Федерация, МПК В64С 27/32, В64С 27/39: №2008118006: заявл. 08.05.2008: опубл. 20.12.2009 / заявитель: ОАО «Камов»
10. Пыхалов А.А. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин: специальность 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Пыхалов Анатолий Александрович: Московский государственный авиационный институт, 2006. 428 с.
11. ГОСТ 270-75. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении = Rubber. Method for determining elastic tensile properties: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 03.02.82 N 439: введен впервые: дата введения 1978-01-01 / разработан и внесен Министерством нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР. Москва: Стандартинформ, 2008. 11 с.
12. Бергштейн Л.А. Лабораторный практикум по технологии резины. Москва: Химия, 1989 г. 248 с.
13. Колпак Е.П. Большие деформации резиновых мембран // Молодой учёный. 2014. №16 (75). С. 78-83.
14. Шмурак М.И., Кучумов А.Г., Воронова Н.О. Анализ гиперупругих моделей для описания поведения мягких тканей организма человека // Master's Journal. №1. 2017. С. 230 – 243.
15. Финк Т.Б. Взаимодействие гиперупругих тел с жесткими телами. Казань: Казанский (Приволжский) Федеральный университет, 2015. 21 с.
16. Википедия. Интернет-энциклопедия. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperelastic\\_material](https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperelastic_material). Режим доступа: свободный. Текст. Изображение: электронные.
17. Слезкин Д.В. Построение модели полимерного резиноподобного материала с помощью инструмента MSC.Software Patran Experimental Data Fitting. Москва: MSC Software Corporation, 2008. 20 с.
18. Тимошенко С. П. Янг С. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.

### References

1. Zenkevich O.C. Metod konechnyh elementov v tekhnike [The finite element method in engineering science]. Moscow: Mir Publ., 1975. 541 p.
2. Ponomarev P.V. Razrabotka siloksanovykh rezin i germetikov s povyshennoj termo-, ognestojkost'yu: dis. ... kand. tekhn. nauk. [Development of siloxane rubbers and sealants with increased thermal and fire resistance: Ph.D. (Engineering) diss.]. Kazan', KNRTU, 2019. 124 p.
3. Averko-Antonovich Yu.O., Omel'chenko R.Ya., Okhotina N.A., Ebich Yu.R. Tekhnologiya rezinovykh izdelij [Technology of rubber products]. Leningrad: Khimiya, 1991. 351 p.
4. Golubev A.I., Kondakov L.A., Ovander V.B., Gordeev V.V., Furmanov B.A., Karmugin B.V. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika [Seals and sealing equipment]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986. 234 p.
5. Zhrebkov S.K. Kreplenie reziny k metallam [Fixing rubber to metals]. Moscow: Goskhimizdat Publ., 1966. 348 p.
6. Smekni. URL: <https://smekni.com/a/172400/kreplenie-reziny-k-metallam/>. Rezhim dostupa: svobodnyj. Tekst. Izobrazhenie: elektronnye.
7. Burcev B.N., Vagis V.P., Selemenev S.V. Soosnyj nesushchij vint vertoleta. Konstrukciya i aeromekhanika [The coaxial rotor of the helicopter. Construction and aeromechanics]. Moscow: Firma «Kamov» Publ., 2004. 30 p.
8. Basharov E.A., Tkachenko S.A. Konstrukciya vtukov vintov vertoleta [Helicopter propeller bushings design]. Moscow: MAI Publ., 2019. 104 p.

9. Vagin A.Yu., Miheev S.V., Plushchevskij A.M., Osmolovskij R.F. Patent RU 2376201 C2, 08.05.2008.
10. Pyhalov A.A. Kontaktnaya zadacha staticheskogo i dinameskogo analiza sbornyh rotorov turbomashin: dis. ... dok. tekhn. nauk [Contact problem of static and dynamic analysis of assembled turbomachine rotors: D. Sc. (Engineering) diss.]. Moscow: MAI Publ., 2006. 428 p.
11. Rezina. Metod opredeleniya uprugoprochnostnyh svojstv pri rastyazhenii GOST 270-75 [Rubber. Method for determining elastic tensile properties, state standard 270-75]. Moscow: Standartinform, 2008, 11 p.
12. Bergshtejn L.A. Laboratornyj praktikum po tekhnologii reziny [Laboratory practicum on rubber technology]. Moscow: Khimiya Publ., 1989. 248 p.
13. Kolpak E.P. Bol'shie deformatsii rezinovykh membrane [Large deformations of rubber membranes]. *Molodoj uchyonyj [Young scientist]*, 2014, No. 16(75). pp. 78-83.
14. Shmurak M.I., Kuchumov A.G., Voronova N.O. Analiz giperuprugih modelej dlya opisaniya povedeniya myagkih tkanej organizma cheloveka [Analysis of hyperelastic models to describe the behavior of soft tissues of the human body]. *Zhurnal magistra [Master's Journal]*, 2017, no 1, pp. 230 – 243.
15. Fink T.B. Vzaimodejstvie giperuprugih tel s zhestkimi telami [Interaction of hyperelastic bodies with rigid bodies]. Kazan': Kazanskij (Privolzhskij) Federal'nyj universitet Publ., 2015. 21 p.
16. Vikipediya. Internet-entsiklopediya. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperelastic\\_material](https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperelastic_material).
17. Slezkin D.V. Postroenie modeli polimernogo rezinopodobnogo materiala s pomoshch'yu instrumenta MSC.Software Patran Experimental Data Fitting [Building a model of a polymer rubber-like material using the MSC.Software Patran Experimental Data Fitting]. Moscow: MSC Software Corporation Publ., 2008. 20 p.
18. Timoshenko S. P. Yang S. H., Uiver U. Kolebaniya v inzhenerenom dele [Vibration problems in engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.

### Информация об авторах

**Михайлов Дмитрий Александрович** – аспирант кафедры «Механика и сопротивление материалов», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: deemass835@gmail.com

**Пыхалов Анатолий Александрович** – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pykhalov\_aa@mail.ru

**Зеньков Евгений Вячеславович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Механика и сопротивление материалов», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, доцент кафедры «Управление качеством и инженерная графика» Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: jovanny1@yandex.ru

**Артюнин Анатолий Иванович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: artyunin\_ai@irgups.ru.

### Information about the authors

**Dmitrij A. Mikhaylov** – Post-Graduate Student of the Department «Mechanics and Strength of Materials», Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: deemass835@gmail.com

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

**Evgenij V. Zen'kov** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of department «Mechanics and resistance of materials», Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Associate Professor of department «Quality management and engineering graphics», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: jovanny1@yandex.ru

**Anatolij I. Artyunin** – Doctor of Engineering Science, the Full Professor of the Department «Physics, mechanics and instrumentation», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: artyunin\_ai@irgups.ru.

## Автоматизированный расчет трехлопастной пропеллерной мешалки для производства серосодержащего сорбента на основе хлорлигнина, селективного к ионам тяжелых металлов

В. С. Асламова<sup>1</sup>✉, А. А. Асламов<sup>2</sup>, Е. А. Головкова<sup>2</sup>, Е. А. Шнегельбергер<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

<sup>3</sup> ООО «АйкьюЭкологджи», Иркутск, Российская Федерация

✉ aslamovav@yandex.ru

### Резюме

В работе выполнена автоматизация расчета физических свойств ингредиентов двухфазной (жидкость – твердое) рабочей среды и гидродинамики перемешивающего устройства для реактора периодического действия, используемого при производстве серосодержащего сорбента на основе хлорлигнина. Сорбент селективен к целому ряду ионов тяжелых металлов. Исходя из результатов расчета физических свойств ингредиентов и обзора конструкций перемешивающих устройств в опытном реакторе использована пропеллерная трехлопастная мешалка для перемешивания рабочей среды с коэффициентом динамической вязкости 6,01 сП и содержанием твердой фазы 31,8 %. Так как в 70-х гг. XX в. было установлено, что из-за несовместимости критериев подобия химических и массообменных процессов масштабный переход в реакторе на основе физического подобия осуществить практически невозможно, то при масштабном переходе от лабораторной установки к малой производственной установке производительностью 200 кг серосодержащего сорбента на один цикл вместо физического подобия были использованы расчетные методы. Следует отметить, что увеличение масштаба установки до  $M = 104$  не скажется на соотношении ингредиентов, используемых для получения нового сорбента (по аналогии с приготовлением блюда в большем количестве и в большей посуде: рецептура приготовления не изменится, масса ингредиентов увеличится в соответствии с масштабом), может измениться лишь время перемешивания, нагрева до 40–45°C и последующего охлаждения смеси до 20°C. Физические свойства твердых ингредиентов определялись по справочникам (для хлорлигнина – экспериментально). Для расчета физических свойств жидких ингредиентов и их смеси использованы известные аддитивные модели. Разработана технологическая схема производства новых серосодержащих сорбентов. Рассчитан профиль окружной скорости, которая квадратично возрастает до максимального значения на окружности, совпадающей по диаметру с мешалкой. В периферийной зоне окружная скорость гиперболически убывает вплоть до стенки реактора. Найдены параметры мешалки, средняя скорость рабочей среды в объеме реактора, мощность перемешивания, глубина образующейся воронки и затраты мощности на перемешивание среды.

### Ключевые слова

автоматизация расчета, пропеллерная мешалка, технологическая схема, серосодержащий сорбент, хлорлигнин

### Для цитирования

Асламова В. С. Автоматизация гидродинамического расчета трехлопастной пропеллерной мешалки для производства серосодержащего сорбента на основе хлорлигнина, селективного к ионам тяжелых металлов / В. С. Асламова, А. А. Асламов, Е. А. Головкова, Е. А. Шнегельбергер // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 48–58. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).48-58

### Информация о статье

поступила в редакцию: 28.09.2021, поступила после рецензирования: 13.10.2021, принята к публикации: 27.10.2021

## Automated calculation of a three-vane propeller mixer for production of the sulfur-containing sorbent based on chlorolignin selective to heavy metal ions

V. S. Aslamova<sup>1</sup>✉, A. A. Aslamov<sup>2</sup>, E. A. Golovkova<sup>2</sup>, E. A. Shnegelberger<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

<sup>3</sup> LLC “AykyuEkology”, Irkutsk, the Russian Federation

✉ aslamovav@yandex.ru

### Abstract

Automation of the calculation of the physical properties of the ingredients of a two-phase (liquid-solid) working medium and the hydrodynamics of a mixing device for a batch reactor used in the production of a sulfur-containing sorbent based on chlorolignin

has been performed. The sorbent is selective for a number of heavy metal ions. Based on the results of calculating the physical properties of the ingredients, a review of the design of mixing devices, a three-blade propeller mixer was used in the experimental reactor for mixing the working medium with a dynamic viscosity coefficient of 6.01 centipoise and a solid phase content of 31.8%. Since it was found in the 70s of the 20th century that, due to the incompatibility of the criteria for the similarity of chemical and mass transfer processes, a large-scale transition in a reactor based on physical similarity is practically impossible, then with a large-scale transition from a laboratory facility to a small production facility with a capacity of 200 kg of sulfur of the sorbent per cycle, instead of physical similarity, computational methods were used. It should be noted that an increase in the scale of the installation to  $M = 104$  will not affect the ratio of ingredients used to obtain a new sorbent (by analogy with cooking a dish in larger quantities and in a larger container: the cooking recipe will not change, the mass of ingredients will increase in accordance with the scale), only the times of mixing, heating to 40–45 °C and subsequent cooling of the mixture to 20 °C can change. The physical properties of solid ingredients were determined by reference books (for chlorolignin - experimentally). Known additive models were used to calculate the physical properties of liquid ingredients and their mixtures. A technological scheme for the production of new sulfur-containing sorbents has been developed. The profile of the peripheral speed is calculated, which quadratically increases to the maximum value on the circle, which coincides in diameter with the mixer. In the peripheral zone, the peripheral velocity hyperbolically decreases down to the reactor wall. Found: the parameters of the mixer, the average speed of the working medium in the volume of the reactor, the mixing power, the depth of the formed funnel and the power consumption for mixing the medium.

### Keywords

automation of calculation, propeller stirrer, technological scheme, sulfur-containing sorbent, chlorolignin

### For citation

Aslamova V. S., Aslamov A. A., Golovkova E. A., Shnegelberger E. A. Avtomatizirovannyi raschet trekhlopastnoy propellernoy meshalki dlya proizvodstva serosoderzhashchego sorbenta na osnove khlorolignina, selektivnogo k ionam tyazhelykh metallov [Automated calculation of a three-blade propeller mixer for the production of sulfur-containing sorbent based on chlorolignin selective to heavy metal ions]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 48–58. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).48-58

### Article info

Received: 28.09.2021, Revised: 13.10.2021, Accepted: 27.10.2021

### Актуальность исследования

Роль автоматизации расчетов технологических аппаратов, вспомогательного оборудования невозможно переоценить. Ведь их автоматизированный расчет способствует сокращению трудоемкости, повышению качества принимаемых проектных решений, снижает существенно производственные затраты, что положительно отражается на себестоимости готовой продукции [1–4].

Очистка промышленных стоков от соединений тяжелых металлов является одной из важнейших задач современного производства и относится к приоритетному направлению науки, технологий и техники. Так, концентрации тяжелых металлов (ртуть, цинк, кадмий, медь, железа и др.) в промышленных стоках гальванических производств Иркутской области от 0,5 до 1,0 г/л, что в 10–100 раз превосходят предельно допустимую концентрацию (ПДК) [5]. Производственные стоки объектов Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД) также содержат ионы тяжелых металлов – цинк, медь, никель [6]. Всестороннее исследование адсорбционной эффективности нового

серосодержащего сорбента с использованием лигнина [7–11] выявило его высокую селективность к соединениям тяжелых металлов. Перечисленное свидетельствует об актуальности задачи разработки алгоритма и программы автоматизированного расчета физических свойств ингредиентов и трехлопастной пропеллерной мешалки, используемой для интенсификации процесса перемешивания при производстве эффективного серосодержащего сорбента, селективного к ионам тяжелых металлов.

### О масштабном переходе от лабораторной установки к промышленной

В 70-х гг. XX в. было установлено, что из-за изменения соотношения отдельных стадий процесса в реакторе масштабный переход (МП) практически невозможно осуществить на основе физического подобия в связи с несовместимостью критериев подобия химических и массообменных процессов [11, 12]. Поэтому при расчете химического реактора с мешалкой физические свойства твердых ингредиентов определялись по справочникам (для хлорлигнина – экспериментально). Для расчета физиче-

ских свойств жидких ингредиентов и их смеси использовались модели, представленные в справочном пособии [13, 14]. Кроме того, использовалось гидродинамическое моделирование, так как эффект масштабирования обусловлен гидродинамической природой. Однако и гидродинамическое моделирование не позволяло полностью осуществить адекватный МП, так как математически очень сложно описать химию процесса и дефекты конструкции и монтажа реактора, подвода реакционной смеси и т. д. Этот эффект можно значительно уменьшить за счет конструктивных способов нивелирования неоднородностей полей скоростей в крупномасштабном реакторе [12].

В химических реакторах при двухфазном механическом перемешивании жидкой и твердой фаз поперечные неравномерности роли не играют. В них масштабный эффект зарождается вследствие изменения размеров циркуляционных контуров и / или продольного перемешивания при увеличении масштаба реактора. Химические реакции оказывают существенное влияние на гидродинамику, могут вызвать также тепловые неравномерности, которые, в свою очередь, могут усилить и гидродинамические неравномерности. В связи с этим к однородности полей скоростей и концентраций в химических реакциях предъявляются повышенные требования [12].

Для снижения неоднородности полей скоростей и концентраций, гидравлического сопротивления будем использовать следующие меры снижения масштабного эффекта:

– усиление продольного перемешивания и скорости движения фаз с помощью мешалки, интенсифицирующей тепло- и массообмен;

– установка в поворотных коленах трубопроводов направляющих лопаток.

Вместо выполнения дорогостоящих исследований на пилотных установках, спроектированных по критериям подобия, при масштабном переходе от лабораторной установки к малой производственной установке использованы расчетные методы, которые базируются на инженерном опыте. Это позволяет при увеличении масштаба реализации химико-технологического процесса сократить степень риска снижения достоверности получаемых результатов [15].

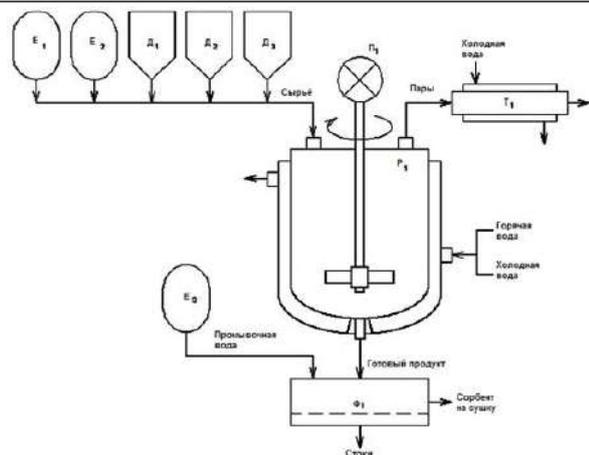
Следует отметить, что увеличение масштаба установки до  $M = 104$  не скажется на

соотношении ингредиентов, используемых для получения нового сорбента (по аналогии с приготовлением блюда в большем количестве и в большей посуде: рецептура приготовления не изменится, масса ингредиентов увеличится в соответствии с масштабом), может измениться лишь время перешивания, нагрева до 40–45 °С и последующего охлаждения смеси до 20 °С.

### **Технология производства серосодержащего сорбента**

Серосодержащий сорбент для очистки сточных вод от соединений тяжелых металлов синтезирован на основе использования отходов производства эпихлоргидрина, хлорированного лигнина, полисульфидов натрия, получаемых из элементной серы (отход производства серной кислоты) и гидроксида натрия в водном растворе в присутствии гидразингидрата в одном реакционном сосуде при непрерывном перемешивании [7]. Масса достаточно вязкая, поэтому достижение равномерного распределения фаз в суспензии очень затруднительно и возможно только при механическом перемешивании. В основном (до 95 % случаев) для перемешивания рабочей среды используется механическое перемешивание по причине энергетической и экономической эффективности, надежности, простоте конструкций вращающихся мешалок [16, 17].

По результатам расчета физических свойств ингредиентов, обзора конструкций перемешивающих устройств, уплотнений вала и теплообменных устройств в опытном емкостном реакторе идеального смешения с теплообменной рубашкой, периодического действия, по рекомендациям [18, 19] для перемешивания в системе «жидкость – твердое», включающего растворение и проведение химических реакций, предложено использовать пропеллерную трехлопастную мешалку, которая применяется для перемешивания вязких жидкостей с  $\mu < 50$  Па·с, с содержанием твердой фазы не более 30 %, очищает стенки емкости от налипающей реакционной массы, выравнивает концентрационные и температурные поля по всему объему реактора. Технологическая схема производства новых серосодержащих сорбентов приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Технологическая схема производства новых сорбентов:  $E_1, E_2, E_3$  – емкости для подачи трихлорпропана, воды и гидразингидрата и промывной воды соответственно;

$D_1, D_2, D_3$  дозаторы щелочи, серы и хлорлигнина соответственно;  $P_1$  – реактор с трехлопастной пропеллерной мешалкой;  $T_1$  – холодильник;  $\Phi_1$  – фильтр;  $\Pi_1$  – привод

**Fig 1.** Technological scheme for the production of new sorbents: tanks for supplying:  $E_1, E_2, E_3$  – trichloropropane, water, hydrazine hydrate and flushing water feeding containers, respectively.  $D_1, D_2, D_3$  – alkali, sulfur and chlorolignin dispensers, respectively.  $P_1$  – tree-vane propeller mixer;  $T_1$  – refrigerator;  $\Phi_1$  – filter;  $\Pi_1$  – drive unit

Установка работает следующим образом. Сначала готовится раствор 25 % концентрации щелочи. Для этого в реактор через загрузочный штуцер заливается вода и при перемешивании засыпается сухая щелочь (NaOH или KOH). Одновременно в рубашку реактора подается горячая вода для нагревания и выдержки смеси при температуре 45 °С (время нагрева смеси 0,507 ч). Когда щелочной раствор готов, в него, не прекращая перемешивания, добавляют серу в виде порошка с размером частиц до 1 мм. При этом происходит растворение серы с образованием полисульфида щелочного металла. Суспензию перемешивают в течение 3 ч. Далее добавляют хлорлигнин и фракции отхода производства эпихлоргидрина (состав, % масс: 1,2,3-трихлорпропан 86,2 %, эпихлоргидрин 6,5 %, дихлорпропанола 6,4 %, остальное – 0,9 %) – хлорорганического отхода. Перемешивают суспензию в течение 6 ч. Затем охлаждают до 20 °С, отфильтровывают осадок. По окончании

процесса конечный продукт выгружается через нижний штуцер на фильтровальное устройство, отправляется на промывку и последующую сушку [20].

В табл. 1 приведена масса ингредиентов согласно найденным соотношениям примера 1 [12] с учетом масштабного коэффициента  $M$ , необходимых для получения серосодержащего сорбента Па в количестве 200 кг.

**Таблица 1.** Состав ингредиентов рабочей среды  
**Table 1.** Composition of the ingredients of the working environment

Наименование ингредиента	Доля, $m_i$	$\varphi_i$	Объем, $m^3$	Масса, кг
Щелочь NaOH (гран.)	0,2458	0,1367	0,15	319,5
H <sub>2</sub> O	0,4606	0,5468	0,6	598,8
Гидразин-гидрат	0,0637	0,0729	0,08	82,8
Сера	0,0764	0,0905	0,048	99,36
Хлорлигнин (гироллизный)	0,0808	0,0911	0,1	105
1,2,3-трихлорпропан	0,0727	0,0620	0,068	94,452
$\Sigma$	1	–	1,097	1 299,9

Объем каждого ингредиента определялся по его доле. Масса ингредиента вычислялась произведением его объема на плотность. Как видно из табл. 1 при выпуске 200 кг сорбента утилизируется 298,8 кг отходов производства (хлорлигнин, сера, 1,2,3-трихлорпропан). Из них израсходовано 99,4 кг серы, хлорлигнина – 105 кг, 1,2,3-трихлорпропана – 94,4 кг. Объем загружаемой реакционной смеси составил  $V_p = 1,097 m^3 \approx 1,1 m^3$ . Рекомендуемый коэффициент загрузки химического реактора 0,75. Тогда объем реактора

$$V = 1,1 / 0,75 = 1,466 \approx 1,5 m^3.$$

Принимаем номинальный объем реактора  $V_n = 1,6 m$ . Согласно данным [18, 21] диаметр реактора  $D = 1,2 m$ , высота 1,42 м. Высота заполнения жидкостью  $H_{ж} = 1,16 m$ .

### Автоматизация расчетов

На рис. 2, 3 представлена блок-схема основной программы гидродинамического расчета мешалки для реактора из условия идеального перемешивания среды. Программа реализована в интегрированной среде Delphi 7.0.

На рис. 4, 5 приведена блок-схема подпрограммы расчета физических свойств

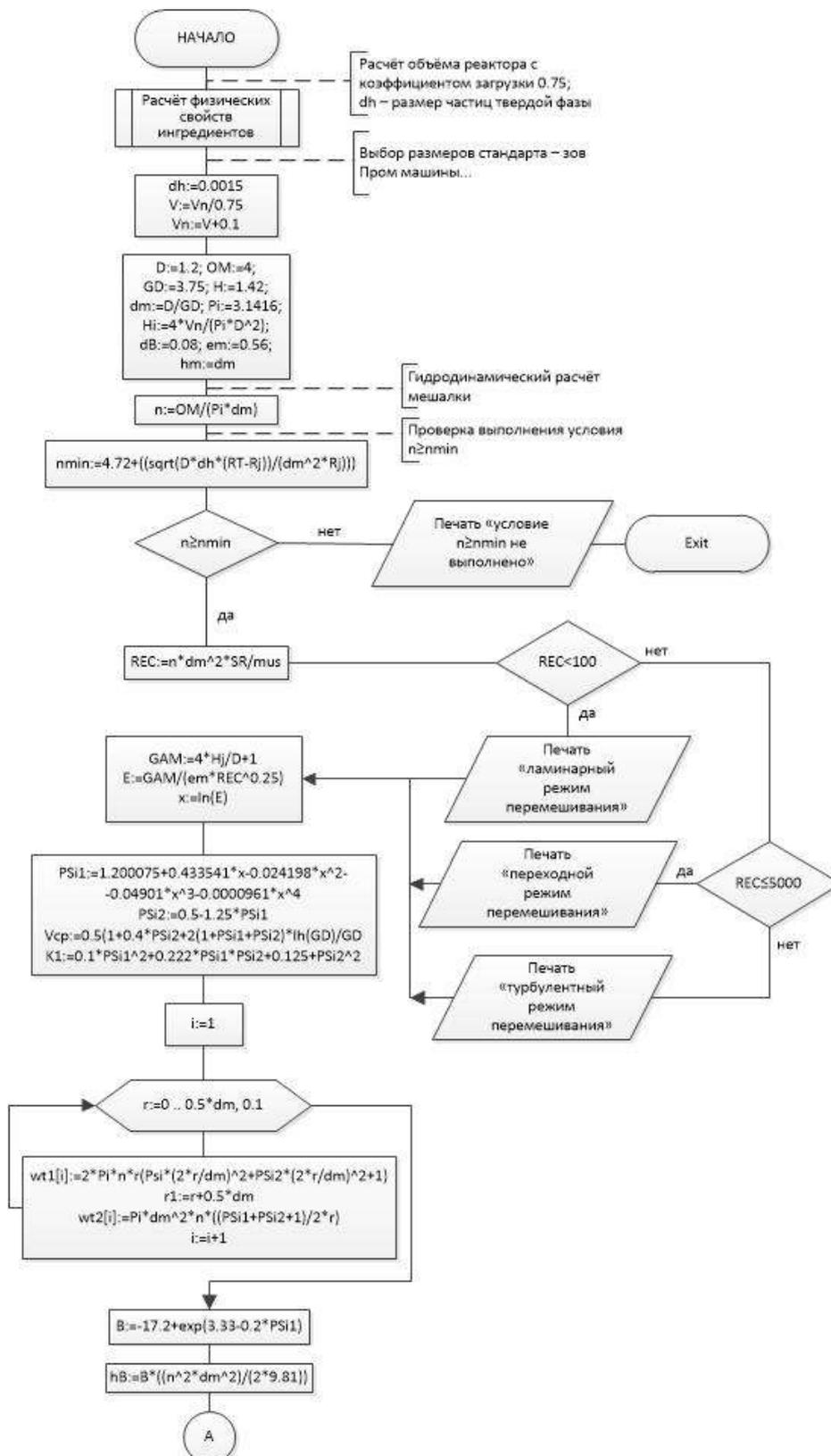


Рис. 2. Блок-схема гидродинамического расчета мешалки  
Fig 2. Block diagram of the hydrodynamic calculation of the mixer

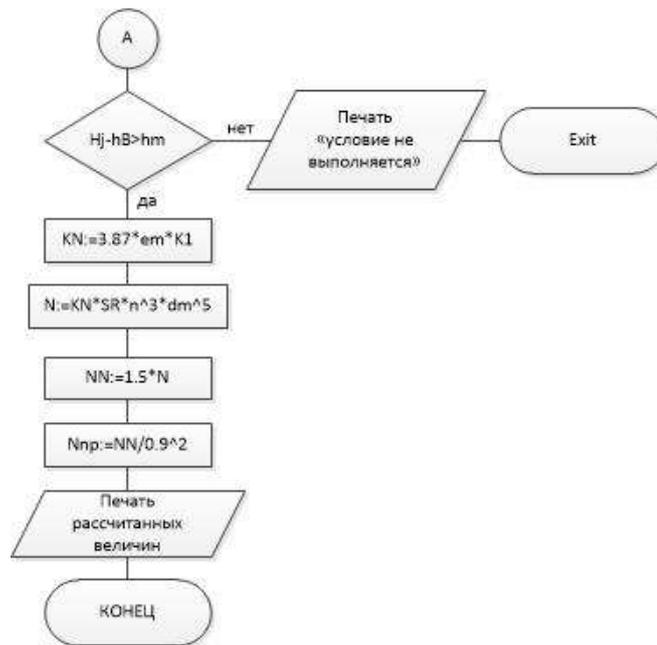


Рис. 3. Продолжение рис. 2

Fig 3. Continuation of fig. 2

рабочей среды и выбор типа мешалок.

Для расчета плотности  $\rho_c$  рабочей среды использовано правило аддитивности:

$$\rho_c = \sum_{i=1} m_i \cdot \rho_i,$$

где  $m_i$ ,  $\rho_i$  – массовая доля и плотность  $i$ -го ингредиента [14].

Для расчета удельной теплоемкости среды в [13] предложена формула:

$$c_{pc} = \sum_{i=1} m_i \cdot c_{pi}.$$

Для определения коэффициента динамической вязкости  $\mu_{ж}$  смеси жидких ингредиентов использована формула:

$$\lg \mu_{жс} = \sum_{i=1} y_i \cdot \lg \mu_{жси},$$

где  $y_i$  и  $\mu_{жси}$  – мольная доля и коэффициент динамической вязкости  $i$ -го жидкого компонента [22].

Коэффициент динамической вязкости  $\mu_c$ , сП рабочей среды при температуре 20 °С и содержании твердой фазы  $\varphi_c = 0,318$  вычислялся по формуле, предлагаемой в [14], и справедливой для  $0,3 < \varphi_c < 0,5$ :

$$\mu_c = \mu_{жс} [1 + 2,5 / (2 - 2,7\varphi_c)]$$

Для расчета коэффициента теплопроводности  $\lambda_i$ , кал/(см·с·К)  $i$ -го жидкого ингредиента использована формула Роббинса и Кингри:

$$\lambda_i = \frac{(88,0 - 4,94H_i)10^{-3}}{\Delta S_i} \left( \frac{0,55 \cdot T_{ci}}{T_p} \right)^{N_i} c_{pmi} \cdot \rho_{mi}^{4/3}, \quad (1)$$

где  $i$  – номер ингредиента;  $T_p = 305,5$  К – средняя рабочая температура смеси, К;  $T_{ci}$  – критическая температура  $i$ -го ингредиента, К;  $c_{pmi}$  – мольная теплоемкость  $i$ -го ингредиента, кал/(моль·К);  $\rho_{mi}$  – мольная плотность  $i$ -го ингредиента, моль/см<sup>3</sup> [13].

Параметр  $H_i$  зависит от молекулярной структуры  $i$ -го ингредиента и выбирается по таблице 10.9 [13]. Показатель степени  $N_i$  находится по формуле:

$$N_i = \begin{cases} 1 & \text{при } \rho_{mi} < 1 \text{ г/см}^3, \\ 0 & \text{при } \rho_{mi} > 1 \text{ г/см}^3. \end{cases}$$

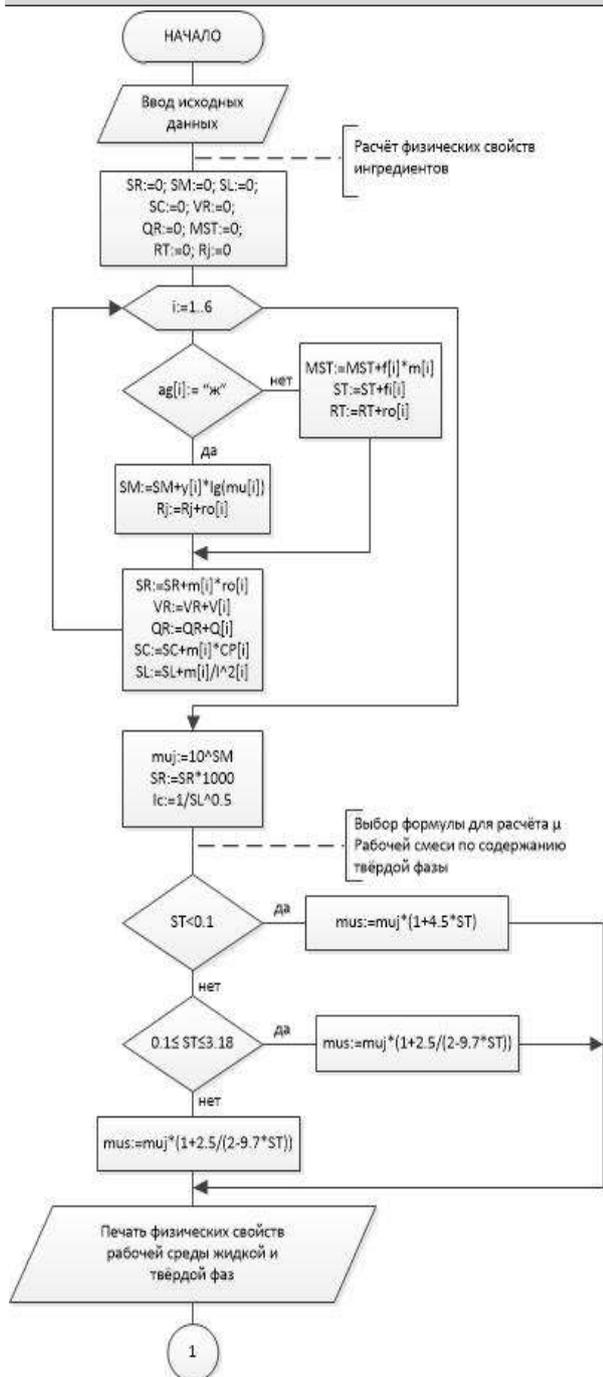
Так как для NaOH, гидразин-гидрата и хлорлигнина  $\rho_{mi} > 1$  г/см<sup>3</sup>, то  $N_i = 0$  и формулу (1) можно упростить:

$$\lambda_i = \frac{(88,0 - 4,94 \cdot H_i) \cdot 10^{-3}}{\Delta S_i} \cdot c_{pmi} \cdot \rho_{mi}^{4/3}.$$

Параметр  $\Delta S_i$  рассчитывается по формуле:

$$\Delta S_i = \frac{\Delta H_{mi}}{T_{ki}} + R \ln \left( \frac{273}{T_{ki}} \right),$$

где  $R = 1,9891$  кал/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;  $\Delta H_{mi}$ , кал/моль – мольная теплота парообразования при нормальной температуре кипения  $T_{ki}$ , К.



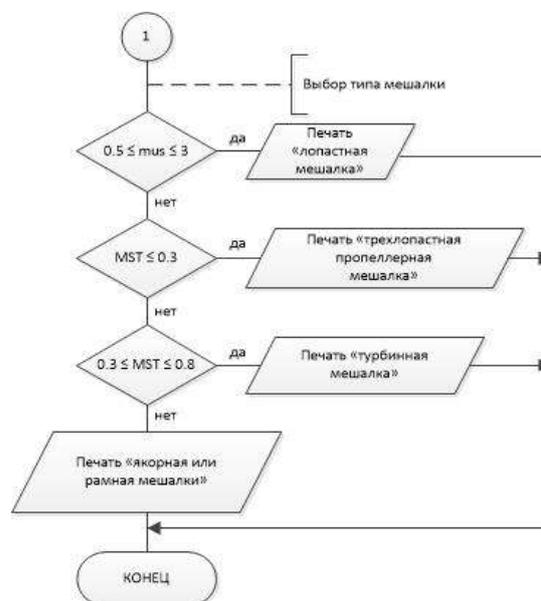
**Рис. 4.** Блок-схема подпрограммы расчета физических свойств рабочей среды и выбор типа мешалок

**Fig 4.** Block diagram of the subroutine for calculating the physical properties of the working environment and the choice of the type of mixers

Результаты расчета по подпрограмме физических свойств среды, жидких и твердых ингредиентов с размером частиц твердой фазы  $\delta = 1,5$  мм указаны в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты расчета по подпрограмме физических свойств среды, жидких и твердых ингредиентов  
**Table 2.** Calculation results for the subprogram of the physical properties of the medium, liquid and solid ingredients

Наименование ингредиента	$\mu_i$ , сП	$\lambda_i$ , кал/(см·с·К)	$\rho_i$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_{pi}$ , Дж/(кг·К)
Щелочь NaOH (гран.)	–	0,00154	2 130	297
H <sub>2</sub> O	1,0060	0,0014	998	4 200
Гидразин-гидрат	0,9693	0,00644	1 035	208,537
Сера	–	0,00154	2 070	710
Хлорлигнин (гидролизный)	–	0,00031	1 050	2 520
1,2,3-трихлорпропан	2,5494	0,00809	1 389	87,037
Рабочая среда	6,0146	0,00091	1 444	2 166,057



**Рис. 5.** Продолжение блок-схемы подпрограммы

**Fig. 5.** Continuation of block diagram of a subroutine

Гидродинамический расчет проводится для определения усредненных характеристик полей скоростей в объеме реактора и глубины образующейся воронки. Необходимо также вычислить мощность, затрачиваемую на перемешивание рабочей среды [19, 21].

Принимаем отношение  $\Gamma_D = D/d_m = 3,75$ . Тогда диаметр пропеллерной мешалки типа 01M  $d_m = D/\Gamma_D = 1,2/3,75 = 0,32$  м. Диаметр вала мешалки  $d_b = 0,08$  м, высота лопасти 0,077 м, ее длина 0,064 м, толщина 0,004 м [21].

Примем для реактора высоту  $h$  расположения мешалки над днищем  $h = d_m = 0,32$  м. Полагаяем окружную скорость мешалки  $\omega = 4$  м/с. Тогда частота вращения мешалки будет равна

$$n = \frac{\omega}{\pi \cdot d_m} = \frac{4}{3,14 \cdot 0,32} = 3,9809 \approx 3,981 \text{ с}^{-1}.$$

Значение  $n$  должно удовлетворять условию:

$$n \geq n_{\min} = C_1 \cdot \left( \frac{D \cdot \delta \cdot (\rho_T - \rho_{ж})}{d_m^4 \cdot \rho_{ж}} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где константа  $C_1 = 4,72$  при перемешивании в системе «твердое – жидкость»:

$$n_{\min} = 4,72 \cdot \left( \frac{1,2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot (865,1 - 579,2)}{0,32^4 \cdot 572} \right)^{0,5} \approx 1,382 \text{ с}^{-1}.$$

Так как  $n = 3,981 > 1,382$ , то условие (2) выполняется.

Принимаем в соответствии с ГОСТ 20680-75 частоту вращения выходного вала редуктора  $n = 4,17 \text{ с}^{-1}$ .

Центробежный критерий Рейнольдса вычислялся по формуле:

$Re_{ц} = n \cdot d_m^2 \cdot \rho_c / \mu_c = 4,17 \cdot 0,32^2 \cdot 1444,3 / 0,06 = 10278,8$ .  
Полученное значение  $Re_{ц}$  свидетельствует о турбулентном режиме перемешивания суспензии.

Найдем величину параметра  $\gamma$  для реактора со свободной поверхностью суспензии по формуле:

$$\gamma = 4H_{ж} / D + 1 = 4 \cdot 1,16 / 1,2 + 1 \approx 3,87.$$

Найдем величину параметра  $E$  по формуле:

$$E = \gamma / \left( \xi_{ж} \cdot Re_{ц}^{0,25} \right) = 3,87 / \left( 0,56 \cdot 10352,74^{0,25} \right) \approx 0,6863.$$

В гладкостенном реакторе поле скоростей характеризуется тангенциальной  $W_t$ , радиальной  $W_r$  и осевой  $W_z$  составляющими скорости  $W$ .

Значение  $\psi_1$  по полиномиальной аппроксимации:

$$\psi_1 = 1,200075 + 0,433541x - 0,024198x^2 - 0,04901x^3 - 0,0000961x^4,$$

где  $x = \ln E = -0,3782$  [23]. Вычисленное в основной программе значение  $\psi_1 = 2,01098$ . Зная значение  $\psi_1$ , можно определить параметр распределения скорости  $\psi_2$  по формуле:

$$\psi_2 = 0,5 - 1,25 \cdot \psi_1 = -2,0137.$$

Для пропеллерных мешалок с  $\Gamma_D \geq 1,5$  функция относительной средней скорости зависит от параметра  $\psi_1$ :

$$V_{cp} = \frac{1 + 0,4\psi_1 + 0,5\psi_2 + 2(1 + \psi_1 + \psi_2) \ln \Gamma_D}{2\Gamma_D} = 0,46 \text{ м/с}.$$

На рис. 6 представлен график окружной скорости суспензии в зоне трехлопастной пропеллерной мешалки, рассчитанный в программе по формулам:

$$W_{t1} = 2\pi nr \left[ \psi_1 \left( \frac{2r}{d_m} \right)^2 + \psi_2 \left( \frac{2r}{d_m} \right)^2 + 1 \right], \quad 0 \leq r \leq 0,5d_m,$$

$$W_{t2} = \pi d_m^2 n \frac{\psi_1 + \psi_2 + 1}{2r}, \quad 0,5d_m \leq r \leq 0,5D.$$

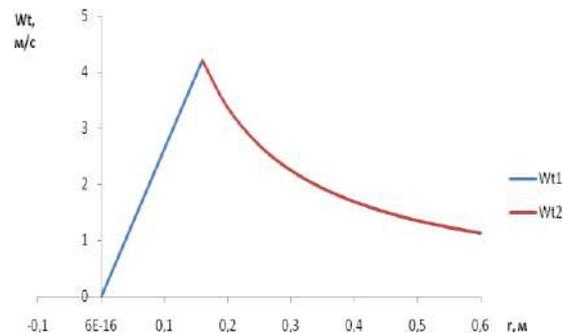


Рис. 6. Окружная скорость суспензии в реакторе в зоне трехлопастной пропеллерной мешалки

Fig. 6. The peripheral velocity of the suspension in the reactor in the zone of a three-blade propeller agitator

Как видно из рис. 6, окружная скорость почти линейно возрастает до максимального значения на диаметре мешалки. В периферийной зоне окружная скорость гиперболически убывает вплоть до стенки реактора.

Для пропеллерных мешалок коэффициент  $K_1(\psi_1)$  найдем по графику 2.19 [23]:  $K_1 = 0,0018$ . Параметр глубины воронки определялся по формуле:

$$B = -17,2 + \exp(3,33 - 0,2\psi_1) = 1,4865.$$

Тогда глубина воронки по РД 26-01-90-85М составит:

$$h_B = B \frac{n^2 d_m^2}{2g} = 1,4865 \frac{4,20^2 \cdot 0,32^2}{2 \cdot 9,81} \approx 0,1369 \text{ м}.$$

Примем высоту установки мешалки над днищем аппарата  $h_m = d_m = 0,32$  м и  $b = 0,1d_m = 0,032$  м.

Высота суспензии в реакторе при перемешивании должна быть больше чем  $h_m$ , т. е. должно выполняться неравенство:

$$H_{ж} - h_B > h_m. \quad (3)$$

Неравенство (3) выполняется:  $1,16 - 0,14 = 1,02 > 0,32$ .

По РД 26-01-90-85М коэффициент сопротивления корпуса реактора для  $G_D > 2$  составит  $\lambda = 0,095$ , коэффициент сопротивления трехлопастной мешалки  $\xi_m = 0,56$ .

Критерий мощности перемешивания

$$K_N = 3,87 \cdot \xi_m \cdot K_1 = 3,87 \cdot 0,56 \cdot 0,018 \approx 0,0390.$$

Мощность, которая потребляется при перемешивании, составит

$$N = K_{Np} \rho_c n^3 d_m^5 = 0,039 \cdot 1444,3 \cdot 4,20^3 \cdot 0,32^5 \approx 13,705 \text{ Вт.}$$

Уточним необходимую мощность привода с учетом пусковых нагрузок, принимая во внимание, что коэффициент  $K_n = 1,5$  по РД 26-01-90-85М для пропеллерных мешалок с  $G_D > 1,5$  при отсутствии внутренних устройств при числах  $Re_n$  больше 500:

$$N_N = K_n \cdot N = 1,5 \cdot 14,0064 \approx 20,2276 \text{ Вт.}$$

Погрешность использованного метода расчета 10–15 %.

Выбор мощности привода реактора с мешалкой производят по результатам гидродинамического расчета с учетом механического КПД привода. Расчетная мощность привода  $N_{пр}$  определяется по формуле:

$$N_{пр} = N_N / (\eta_{пр} \cdot \eta_{упл})$$

где  $\eta_{пр}$  – КПД привода;  $\eta_{упл}$  – КПД уплотнения, которые могут принимать следующие значения в зависимости от исполнения и мощности привода, конструкции уплотнения:

$$\eta_{пр} \approx 0,75 - 0,95; \eta_{упл} \approx 0,9 - 0,98.$$

Принимаем  $\eta_{пр} = 0,75$ ,  $\eta_{упл} = 0,9$ . Тогда мощность привода будет равна

$$N_{пр} = 21,00961 / (0,9 \cdot 0,9) = 25,38 \text{ Вт.}$$

По значению  $N_{пр}$  выбираем стандартный привод, который удовлетворяет ближайшему целому значению  $N_{пр}$ : мотор-редуктор с номинальной мощностью  $N_p = 0,25$  кВт по табл. 11 приложения [18].

## Заключение

С использованием расчетных методов выполнен масштабный переход от лабораторной установки к малой производственной установке производительностью 200 кг серосодержащего сорбента на один цикл. Разработана технологическая схема производства новых серосодержащих сорбентов. Выполненная алгоритмизация и автоматизация расчетов физических свойств ингредиентов двухфазной рабочей среды и гидродинамики трехлопастной пропеллерной мешалки обеспечивает сокращение времени и высокую точность расчетов.

## Список литературы

1. Малявко О.И., Елагин М.С., Орешкин А.С. Автоматизация механических расчетов валов технологического оборудования // В.И. Вернадский: устойчивое развитие регионов: материалы Международной научно-практической конференции. В 5 т. Т. 1 / под научн. ред. В.А. Грачева и др. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. С. 142–144.
2. Борисенко А.Б., Антоненко А.В., Осовский А.В., Филимонова О.А. Система автоматизированного выбора вспомогательного оборудования многоассортиментных химических производств // Вестник Тамбовского ГТУ. 2012. Т. 18. № 3. С. 569–572.
3. Малявко О.И., Мокрозуб В.Г. Автоматизированный расчет валов в среде Internet // Техника и технологии машиностроения: материалы IV международной студенческой научно-практической конференции. Омск: Изд-во ОмГУ, 2015. С. 154–157.
4. Немтинов В.А., Мокрозуб А.В., Ерохина И.Н. Автоматизированный расчет заготовок днищ емкостных аппаратов // В.И. Вернадский: устойчивое развитие регионов: материалы Международной научно-практической конференции. В 5 т. Т. 1 / под научн. ред. В.А. Грачева и др. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. С. 151–154.
5. Домрачева В.А., Вещева Е.Н. Модифицирование углеродных сорбентов для повышения эффективности извлечения тяжелых металлов из сточных вод и техногенных образований // Вестник ИрГТУ. 2010. № 4 (44). С. 134–138.
6. Шалунц Л.В., Асламова В.С. Экспериментальные данные извлечения ионов меди, никеля и цинка из водных растворов реальных сточных вод модифицированным цеолитом // Научное и образовательное пространство: перспективы развития: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 28 февраля 2020 г.) / редкол.: О.Н. Широков [и др.]. Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2020. С. 86–91. URL: <https://interactive-plus.ru/ru/action/686/imprint> (дата обращения 14.03.2020).
7. Пат. № 2558896. Российская Федерация. Способ получения сорбента для очистки сточных вод от соединений тяжелых металлов / Е.А. Чернышева, В.А. Грабельных, Е.П. Леванова, О.Н. Игнатова, И.Б. Розенцвейг, Н.В. Руссавская [и др.]; заявл. 06.06.2014, опублик. 10.08.2015 г. Бюл. № 22.
8. Aslamova V.S., Chernysheva E.A., Grabelnykh V.A., Levanova E.P., Russavskaya N.V. Regression analysis of zinc and cadmium ion extraction from aqueous solutions using a lignin-based sulphur-containing sorbent. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]*. 2018. Vol. 8, No. 4. Pp. 174–183.
9. Чернышева Е.А., Асламова В.С., Грабельных В.А., Леванова Е.П. Регрессионные зависимости адсорбции ионов ртути из водных растворов серосодержащим сорбентом на основе лигнина // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы Девятой международной научно-практической конференции, г. Иркутск.: в 2 т. Т. 1. Иркутск: ИрГУПС, 2018. С. 286–291.
10. Чернышева Е.А., Асламова В.С. Регрессионные модели извлечения ионов кадмия из водных растворов серосодержащим сорбентом на основе лигнина // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 2 / под общ. ред. А.А. Большакова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 21–24.

11. Боресков Г.К. Моделирование химических процессов // Вестник Академии наук СССР. 1964. № 5. С. 47–56.
12. Розен А.М., Мартюшин Е.И., Олевский В.М. и др. Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования. М.: Химия, 1980. 320 с.
13. Рид Р., Праусниц ДЖ., Шервуд Т. Свойства жидкостей и газов: справочное пособие. Л.: Химия, 1982. 592 с.
14. Расчет физико-химических свойств реакционной смеси. URL: [http://www.fptl.ru/files/oborudovanie/ras4et\\_fiziko-himi4eskih-svoystv.pdf](http://www.fptl.ru/files/oborudovanie/ras4et_fiziko-himi4eskih-svoystv.pdf) (дата обращения 20.12.2019).
15. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. URL: <https://chem21.info/info/1754159/> (дата обращения 16.01.2020).
16. Барабаш В.М., Абиев Р.Ш., Кулов Н.Н. Обзор работ по теории и практике перемешивания // Теоретические основы химической технологии. 2018. Т. 52. № 4. С. 367–383.
17. Cudak M., Domanski M., Szoplik J., Karcz J. An effect of the impeller eccentricity on the process characteristics in an agitate of vessel // Proceedings of 15th European Conference on Mixing. St. Petersburg: Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), 2015. P. 75.
18. Доманский И.В., Исаков В.П., Островский Г.М. и др. Машины и аппараты химических производств: Примеры и задачи: учебное пособие. Под общ. ред. В.Н. Соколова. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1982. 384 с.
19. Карпушкин С.В., Краснянский М.Н., Борисенко А.Б. Расчеты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. 168 с.
20. Асламова В.С., Шнейгельбергер Е.А., Асламов А.А. Технология и оборудование производства серосодержащих сорбентов для извлечения тяжелых металлов из сточных вод // Сб. статей междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы технико-технологических систем и физико-математических моделей» (1 марта 2020, г. Самара). Уфа: Аэтерна, 2020. С. 18–22.
21. Альбом типовых конструкций. Мешалки. Типы, параметры, конструкция, основные размеры и технические требования. АТК 24.201.17-90.
22. Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1968. 848 с.
23. Беляев В.М., Миронов В.М. Расчет и конструирование основного оборудования отрасли: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. 288 с.

### References

1. Malyavko O.I., Elagin M.S., Oreshkin A.S. Automation of mechanical calculations of process equipment shafts [Automation of mechanical calculations of process equipment shafts]. *IN AND. Vernadsky: sustainable development of regions: materials of the International scientific and practical conference. In 5 volumes. T. 1 / under scientific. ed. V.A. Gracheva and others [IN AND. Vernadsky: sustainable development of regions: materials of the International scientific and practical conference. In 5 volumes. T. 1 / under scientific. ed. V.A. Gracheva and others].* Tambov: Publishing house of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "TSTU", 2016. pp. 142–144.
2. Borisenko A.B., Antonenko A.V., Osovsky A.V., Filimonova O.A. The system of automated selection of auxiliary equipment for multi-assortment chemical production [The system of automated selection of auxiliary equipment for multi-assortment chemical production]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tambov State Technical University].* 2012. Vol. 18. No. 3. pp. 569–572.
3. Malyavko O.I., Mokrozub V.G. Automated calculation of shafts in the Internet environment [Automated calculation of shafts in the Internet environment]. *Engineering and technology of mechanical engineering: materials of the IV international student scientific and practical conference. [Engineering and technology of mechanical engineering: materials of the IV international student scientific and practical conference].* Omsk: Publishing house of OMGU, 2015. pp. 154–157.
4. Nemtinov V.A., Mokrozub A.V., Erokhina I.N. Automated calculation of blanks for the bottoms of tank devices [Automated calculation of blanks for the bottoms of tank devices]. *IN AND. Vernadsky: sustainable development of regions: materials of the International scientific and practical conference. In 5 volumes. T. 1 / under scientific. ed. V.A. Gracheva and others [IN AND. Vernadsky: sustainable development of regions: materials of the International scientific and practical conference. In 5 volumes. T. 1 / under scientific. ed. V.A. Gracheva and others].* Tambov: Publishing house of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "TSTU", 2016. pp. 151–154.
5. Domracheva V.A., Veshcheva E.N. Modification of carbon sorbents to improve the efficiency of extraction of heavy metals from wastewater and industrial formations [Modification of carbon sorbents to improve the efficiency of extraction of heavy metals from wastewater and industrial formations]. *Vestnik IrGTU. [ISTU Bulletin].* 2010. No. 4 (44). pp. 134–138.
6. Shalunts L.V., Aslamova V.S. Experimental data on the extraction of copper, nickel and zinc ions from aqueous solutions of real wastewater by modified zeolite [Experimental data on the extraction of copper, nickel and zinc ions from aqueous solutions of real wastewater by modified zeolite]. *Scientific and educational space: development prospects: materials of the XVI Intern. scientific-practical conf. (Cheboksary, February 28, 2020) / editorial board: O. N. Shirokov [and others]. [Scientific and educational space: development prospects: materials of the XVI Intern. scientific-practical conf. (Cheboksary, February 28, 2020) / editorial board: O. N. Shirokov [and others]].* Cheboksary: Central nervous system "Interactive plus", 2020. pp. 86–91. URL: <https://interactive-plus.ru/ru/action/686/imprint> (date of treatment 03.14.2020).
7. Chernysheva E.A., Grabelnyh V.A., Levanova E.P., Ignatova O.N., Rozencvejk I.B., Russavskaya N.V., et al. Sposob polucheniya sorbenta dlya ochistki stochnyh vod ot soedinenij tyazhelyh metallov. zayavl; Patent RF. No. 2558896, 2015.
8. Aslamova V.S., Chernysheva E.A., Grabelnykh V.A., Levanova E.P., Russavskaya N.V. Regression analysis of zinc and cadmium ion extraction from aqueous solutions using a lignin-based sulphur-containing sorbent. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology].* 2018. Vol. 8. No. 4. pp. 174–183.
9. Chernysheva E.A., Aslamova V.S., Grabelnyh V.A., Levanova E.P. Regressionnyye zavisimosti adsorbtsii ionov rtuti iz

vodnyh rastvorov serosoderzhashim sorbentom na osnove lignin [Regression dependences of the adsorption of mercury ions from aqueous solutions by a sulfur-containing sorbent based on lignin]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: Materialy Devyatoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Transport infrastructure of the Siberian region: Proceedings of the Ninth International Scientific and Practical Conference, Irkutsk : in 2 volumes]*. Vol. 1. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. pp. 286–291.

10. Chernysheva E.A., Aslamova V.S. Regressionnyye modeli izvlecheniya ionov kadmiya iz vodnyh rastvorov serosoderzhashim sorbentom na osnove lignin [Regression models for the extraction of cadmium ions from aqueous solutions with a sulfur-containing sorbent based on lignin]. *Matematicheskie metody v tehnikе i tehnologiyah: sb. tr. mezhdunar. nauch. konf.: in 12 volumes [Mathematical methods in engineering and technology: collection of articles. tr. international scientific. Conf. : in 12 volumes. Vol. 2 / pod obsh. red. A. A. Bolshakova]*. SPb.: Politehn. un-t Publ., 2018. pp. 21–24.

11. Borekov G.K. Modelirovanie himicheskikh processov [Simulation of chemical processes]. *Vestnik Akademii nauk SSSR [Bulletin of the USSR Academy of Sciences]*. 1964. No. 5. pp. 47–56.

12. Rozen A.M., Martyushin E.I., Olevskiy V.M. i dr. Masshabnyj perehod v himicheskoy tehnologii: razrabotka promyshlennykh apparatov metodom gidrodinamicheskogo modelirovaniya [Large-scale transition in chemical technology: the development of industrial devices by the method of hydrodynamic modeling]. Moscow: Himiya, 1980. 320 p.

13. Rid R., Prausnic D.Zh., Shervud T. Svoystva zhidkostej i gazov: spravocnoe posobie [Properties of liquids and gases: a reference guide]. Leningrad: Himiya, 1982, 592 p.

14. Calculation of the physicochemical properties of the reaction mixture. URL: [http://www.fptl.ru/files/oborudovanie/ras4et\\_fiziko-himi4eskih-svoystv.pdf](http://www.fptl.ru/files/oborudovanie/ras4et_fiziko-himi4eskih-svoystv.pdf) (date of treatment 12/20/2019).

15. Chemist's Handbook 21. Chemistry and Chemical Technology. URL: <https://chem21.info/info/1754159/> (date of access 01/16/2020).

16. Barabash V.M., Zelenskij V.E. Peremeshivanie suspenzij [Review of papers on mixing theory and practice]. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii [Theoretical foundations of chemical technology]*. 1997. Vol. 31. No. 5. pp. 465–473.

17. Cudak M., Domanski M., Szoplik J., Karcz J. An effect of the impeller eccentricity on the process characteristics in an agitate of vessel. *Proceedings of 15th European Conference on Mixing. St. Petersburg: Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2015. 75 p.

18. Domansky I.V., Isakov V.P., Ostrovsky G.M. and other Machines and devices of chemical production [Machines and devices of chemical production: Examples and tasks]: examples and tasks: a tutorial. Under total. ed. V.N. Sokolov. *Mechanical engineering*. L.: Leningrad branch, 1982. 384 p.

19. Karpushkin S.V., Krasnyansky M.N., Borisenko A.B. Calculations and selection of mechanical mixing devices for vertical capacitive devices [Calculations and selection of mechanical mixing devices for vertical vessels]. Tambov: Publishing house of Tamb. state tech. University, 2009. 168 p.

20. Aslamova V.S., Shneigelberger E.A., Aslamov A.A. Technology and equipment for the production of sulfur-containing sorbents for the extraction of heavy metals from wastewater [Technology and equipment for the production of sulfur-containing sorbents for the extraction of heavy metals from wastewater]. *Sat. articles of international. scientific-practical conf. "Problems of technical and technological systems and physical and mathematical models" (March 1, 2020, Samara) [Sat. articles of international. scientific-practical conf. "Problems of technical and technological systems and physical and mathematical models" (March 1, 2020, Samara)]*. Ufa: Aeterna, 2020. pp. 18–22.

21. Albom tipovykh konstrukcij. Meshalki. Tipy, parametry, konstrukciya, osnovnye razmery i tehicheskie trebovaniya. ATK 24.201. pp 17-90.

22. Planovsky A.N., Ramm V.M., Kagan S.Z. Processes and devices of chemical technology [Processes and devices of chemical technology]. Moscow: Chemistry, 1968. 848 p.

23. Belyaev V.M., Mironov V.M. Calculation and design of the main equipment of the industry [Calculation and design of the main equipment of the industry]: a tutorial. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic. University, 2009. 288 p.

### Информация об авторах

**Асламова Вера Сергеевна** – д-р техн. наук, профессор, кафедра техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: aslamovav@yandex.ru.

**Асламов Александр Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент, кафедра машин и аппаратов химических производств, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: aaa\_mx@angtu.ru.

**Головкова Елена Александровна** – канд. техн. наук, доцент, кафедра промышленной электроники и информационно-измерительной техники, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: temnikova\_ea@bk.ru.

**Шнегельбергер Евгения Александровна** – инженер-эколог, ООО «АйкьюЭкологджи», г. Иркутск, e-mail: chern5218@yandex.ru.

### Information about the authors

**Vera S. Aslamova** – Dr. Sci., Professor, Department of Technosphere Safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: aslamovav@yandex.ru.

**Alexander A. Aslamov** – Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Department of Machines and Devices of Chemical Production, Angarsk State Technical University, e-mail: aaa\_mx@angtu.ru.

**Elena A. Golovkova** – Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Department of Industrial Electronics and Information and Measuring Technology, Angarsk State Technical University, e-mail: temnikova\_ea@bk.ru.

**Evgeniya A. Shnegelberger** – environmental engineer, “AykyuEkology” LLC, Irkutsk, e-mail: chern5218@yandex.ru.

## Принятие решений по этапному изменению облика и мощности мультимодальной транспортной сети

Н. С. Нестерова<sup>1</sup>✉, В. А. Анисимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ mer-maid2@yandex.ru

### Резюме

В статье предложена методика принятия решений по этапному изменению облика и мощности мультимодальной транспортной сети для методологии проектирования ее развития. Мультимодальная транспортная сеть формируется из объектов единой транспортной сети: мультимодальных транспортных узлов и транспортных звеньев различных видов транспорта как совокупность мультимодальных транспортных коридоров. Предлагаемая методика является инструментом методологии, с помощью которого лицо, принимающее решение, выбирает из сформированной области эффективных стратегий развития мультимодальной транспортной сети наилучшую. Для учета неопределенности сценариев социально-экономического развития страны, ее регионов, конъюнктуры на мировых рынках экспортного минерального сырья, международной геополитической ситуации и других факторов, влияющих на принятие решения, используются расчетные случаи. Они задают вариативность условий реализации стратегий. Математическая модель расчетного случая включает в себя: вариант сценария социально-экономического развития исследуемого региона, вариант потребных объемов перевозок по мультимодальным транспортным коридорам и соответствующую им расчетную схему облика мультимодальной транспортной сети. Область эффективных стратегий формируется для каждого расчетного случая. Выбор наилучшей стратегии возможен, во-первых, из области эффективных стратегий, сформированной по одному расчетному случаю; во-вторых, из объединенной по всем расчетным случаям области эффективных стратегий; в-третьих, из множества эффективных стратегий, обеспечивающих освоение потребных объемов перевозок в нескольких расчетных случаях. Лицо, принимающее решение, при выборе стратегий использует сбалансированную систему показателей как инструмент многокритериальной оценки стратегий изменения облика и мощности мультимодальной транспортной сети. Совокупность сбалансированных показателей позволяет оценить эффективность стратегий с учетом возможных социально-экономических последствий их реализации для общества в целом, экономики страны, транспортной отрасли, а также оценить привлекательность инвестиционного проекта для его потенциальных участников.

### Ключевые слова

мультимодальная транспортная сеть, стратегия развития, транспортный коридор, транспортный узел, область эффективных стратегий, расчетный случай, сбалансированная система показателей

### Для цитирования

Нестерова Н. С. Принятие решений по этапному изменению облика и мощности мультимодальной транспортной сети / Н. С. Нестерова, В. А. Анисимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 59–67. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).59-67

### Информация о статье

поступила в редакцию: 10.09.2021, поступила после рецензирования: 15.09.2021, принята к публикации: 11.10.2021

## Decision-making to gradually change the appearance and capacity of the multimodal transport network

N. S. Nesterova<sup>1</sup>✉, V. A. Anisimov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, the Russian Federation

✉ mer-maid2@yandex.ru

### Abstract

A method of decision-making on the step-by-step change of the appearance and capacity of a multimodal transport network for the methodology of designing its development is proposed. A multimodal transport network is formed with the objects of a single transport network: multimodal transport hubs and transport links of various types of transport, as a set of multimodal transport corridors. The proposed methodology is a methodological tool, by which the decision-maker chooses the best one from the formed area of effective strategies for the development of a multimodal transport network. Calculation cases are used to take into account the uncertainty of the scenarios of the socio-economic development of the country, its regions, the conjuncture on the

world markets of export mineral raw materials, the international geopolitical situation and other factors affecting the decisions to be made. They set the variability of the conditions for the implementation of strategies. The mathematical model of the calculated case includes: a variant of the scenario of the socio-economic development of the studied region, a variant of the required volumes of traffic along multimodal transport corridors and the corresponding calculation scheme of the appearance of the multimodal transport network. The area of effective strategies is formed for each calculation case. Choosing the best strategy is possible: 1) from the area of effective strategies formed for one calculated case; 2) from the area of effective strategies combined for all calculated cases; 3) from a variety of effective strategies that ensure the development of the required traffic volumes in several calculated cases. The decision-maker, when choosing strategies, uses a balanced system of indicators as a tool for multi-criteria evaluation of strategies for changing the appearance and capacity of a multimodal transport network. The combination of balanced indicators makes it possible to assess the effectiveness of strategies, taking into account the possible socio-economic consequences of their implementation for society as a whole, the country's economy, the transport industry, as well as to assess the attractiveness of an investment project for its potential participants.

### Keywords

multimodal transport network, development strategy, transport corridor, transport hub, area of effective strategies, calculation case, balanced scorecard

### For citation

Nesterova N. S., Anisimov V. A. Prinyatie resheniy po ehtapnomu izmeneniyu oblika i moshhnosti mul'timodal'noy transportnoy seti [Decision-making to gradually change the appearance and capacity of the multimodal transport network]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 59–67.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).59-67

### Article Info

Received: 10.09.2021, Revised: 15.09.2021, Accepted: 11.10.2021

### Введение

В Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. (далее – Стратегия) обозначены основные общесистемные проблемы развития транспортной отрасли страны [1]. Выделим из них те, которые особенно актуальны на текущий момент для Сибири, Дальнего Востока и Арктической зоны России:

- наличие территориальных и структурных диспропорций в развитии транспортной инфраструктуры;
- недостаточный уровень доступности транспортных услуг для населения, мобильности трудовых ресурсов;
- недостаточное качество транспортных услуг;
- низкий уровень экспорта транспортных услуг, в том числе использования транзитного потенциала.

Основные мероприятия Стратегии направлены на решение перечисленных проблем. В качестве ограничений приняты заданные уровни безопасности и экологичности транспорта, при этом разработаны три сценарных варианта – инерционный, энергосырьевой и инновационный.

Во всех сценарных вариантах Стратегия указывает на приоритетность реализации транзитного потенциала страны и опережающего развития транспортной инфраструктуры на

направлениях экспортных поставок грузов, в первую очередь развитие морских портов и подходов к ним. При этом требуется совместить рост добычи, переработки и транспортировки к морским портам запасов природных ресурсов общемирового значения и реализацию транзитного потенциала на направлениях с экспортными перевозками грузов. Задача очень сложная вследствие ее большой размерности, а также неопределенности социально-экономического развития страны и регионов, конъюнктуры на мировых рынках экспортного минерального сырья и международной геополитической ситуации, и требует научно-методологического сопровождения ее реализации.

Анализ отечественных и зарубежных научных исследований ученых и специалистов транспортной сферы [2–26] показал, что разработки модели, методы и методики решения однокритериальных и многокритериальных, детерминированных и недетерминированных, статических и динамических задач развития участков, звеньев, узлов, направлений и отдельных транспортных коридоров. Для того чтобы их использовать в качестве инструментов единой методологии проектирования развития многовидовой транспортной инфраструктуры, необходима их модификация. В [27–32] предложены и разработаны понятия, модели и методики, объединенные в методоло-

гию проектирования развития мультимодальной транспортной сети (МТС) (далее – Методология) с учетом логических и функциональных связей задач развития транспортной инфраструктуры для мультимодальных транзитных и экспортно-импортных перевозок.

Для уменьшения размерности задач развития МТС в Методологии предлагается формировать ее из объектов единой транспортной сети как совокупности мультимодальных транспортных коридоров (МТК), состоящих из мультимодальных транспортных узлов (МТУ) и транспортных звеньев (ТЗ) различных видов транспорта [27].

Методология разработана и изложена в [27–30], ее функциональная структура представлена:

- постановкой проблемы проектирования развития МТС;
- формированием вариантов облика МТС;
- формированием возможных стратегий этапного изменения облика и мощности объектов МТС;
- формированием области эффективных стратегий этапного изменения облика и мощности МТС;
- выбором наилучшего решения из области эффективных стратегий этапного изменения облика и мощности МТС с учетом принятых ограничений;
- научно-методологическим сопровождением реализации принятой стратегии формирования и развития МТС [27].

В данной статье рассмотрим подробнее разработанную методику принятия решений по этапному изменению облика и мощности МТС, которую авторы предлагают использовать для выбора наилучшего решения из области эффективных стратегий с учетом вариативности условий их реализации.

### Методика принятия решений

В [27, 28] с применением теории систем разработаны теоретико-множественные модели МТС, МТК, МТУ, ТЗ и стратегий их развития, являющиеся математической основой методологии проектирования МТС. С помощью данных моделей, применяя четырехуровневую декомпозицию МТС, объединяют результаты решения локальных задач развития объектов МТС в единую стратегию.

В [29] предложена методика формирования исходного множества возможных стратегий изменения облика и мощности объектов МТС  $Str^{g^o}(t) = \{\Omega_{ИМС_{irs}}\}$ , из которых агрегируют исходное множество стратегий развития МТС  $Str^{MTN}(t) = \{\Omega_{ИМС_{irs}}^{MTN}\}$  для каждого расчетного случая  $RS = \{RS_{i_{rs}} | i_{rs} = \overline{1, n_{rs}}\}$ .

С помощью расчетных случаев задают вариативность условий реализации стратегий. Они позволяют учесть влияние политических, экономических, социальных и других факторов, воздействующих на развитие МТС извне.

Математическая модель расчетного случая предложена в [30] и включает в себя сценарий социально-экономического развития исследуемого региона  $scr_{i_{scr}} = \{\Gamma_{i_{scr}}, A_{i_{scr}}, K_{i_{scr}}\}$ , вариант потребных объемов перевозок по мультимодальным транспортным коридорам  $VG_{i_{vg}}$  и соответствующую им расчетную схему облика МТС  $Rsch_{i_{Rsch}}$ , где  $\Gamma_{i_{scr}}$  – потребные объемы перевозок при  $i_{scr}$ -м сценарии без учета транспортных потоков по МТК;  $A_{i_{scr}}$  – тарифы на перевозки при  $i_{scr}$ -м сценарии;  $K_{i_{scr}}$  – возможный объем инвестиций при  $i_{scr}$ -м сценарии. По сценариям определяются варианты загрузки объектов МТС транспортными потоками по годам расчетного периода и направлениям движения:

$$\Gamma_{i_{scr}}^{g^o}(t) = \sum_{dir(g^o)} \Gamma_{i_{scr}}^{g^o, dir(g^o)}(t),$$

где  $dir(g^o)$  – направления движения транспортных потоков на объекте МТС [27].

При агрегировании исходного множества  $Str^{MTN}(t)$  для каждого расчетного случая по уровням декомпозиции МТС сначала определяют допустимые множества стратегий развития ТЗ –  $\Omega_{ДМС_{irs}}^{ZV}$ , МТУ –  $\Omega_{ДМС_{irs}}^{MTY}$ , МТК –  $\Omega_{ДМС_{irs}}^{MTK}$ , исключая из исходных множеств стратегии с потребным объемом инвестиций, превышающим возможный в соответствующем расчетному случаю сценарии. Затем на сетевом уровне декомпозиции для каждого  $RS_{i_{rs}}$  из  $\Omega_{ИМС_{irs}}^{MTN}$  выделяют допустимое множество

$\Omega_{\text{ДМС}_{i_{rs}}}^{\text{MTN}}$ , в котором все стратегии удовлетворяют условию  $K(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}) \leq K_{i_{scr}(i_{rs})}(t)$ .

В [31] приведено описание методики формирования области эффективных стратегий (ОЭС) развития МТС  $Str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}(t)^*$ , народнохозяйственная эффективность которых положительна.

ОЭС используется в методологии для выбора наилучшей стратегии этапного изменения облика и мощности МТС.

Выбор наилучшей стратегии возможен:

1. Из области эффективных стратегий  $Str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}(t)^*$ , сформированной по одному расчетному случаю  $i_{rs}$ .

2. Из объединенной по всем расчетным случаям области эффективных стратегий  $\bigcup_{i_{rs} \in RS} Str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}(t)^*$ ,  $RS = \{RS_{i_{rs}} \mid i_{rs} = \overline{1, n_{rs}}\}$ .

3. Из множества эффективных стратегий  $\bigcap_{i_{rs} \in RS} Str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}(t)^* \neq \emptyset$ ,  $RS = \{RS_{i_{rs}} \mid i_{rs} = \overline{1, n_{rs}}\}$ , обеспечивающих освоение потребных объемов перевозок в нескольких расчетных случаях.

Лицо, принимающее решения (ЛПР), при выборе использует инструмент многокритериальной оценки стратегий изменения облика и мощности МТС, разработанный на основе сбалансированной системы показателей (ССП). Совокупность сбалансированных показателей позволяет оценить эффективность стратегий с учетом возможных социально-экономических последствий их реализации для общества в целом, экономики страны, транспортной отрасли, а также оценить привлекательность инвестиционного проекта для его потенциальных участников [32].

Рассмотрим три варианта математической постановки задачи принятия решения по этапному изменению облика и мощности МТС на основе использования СПП:

1. Из области эффективных стратегий развития МТС выбрать такую стратегию, для которой при заданных инвестициях все критерии цели будут максимальны:

$$\left. \begin{aligned} & K(t, Str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}) \leq K_{i_{scr}(i_{rs})}(t), \\ & \left. \begin{aligned} & \mathcal{E}_{\text{общ}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}), \mathcal{E}_{\text{нх}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}), \mathcal{E}_o(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}), \\ & tm(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}), \Delta t_{\text{д(сп)}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}), \Delta t_{\text{д(nc)}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}), \\ & K_z(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}) - \Delta t_{\text{ном}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}) \end{aligned} \right\} \rightarrow \max \end{aligned}$$

где  $K(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}})$  – потребные инвестиции для реализации стратегии, млн руб.;  $K_{i_{scr}(i_{rs})}(t)$  – заданные инвестиции, т. е. возможный объем инвестиций в соответствующем расчетному случаю сценарии социально-экономического развития исследуемого региона, млн руб.;  $\mathcal{E}_{\text{общ}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}})$  – общественная эффективность, млн руб.;  $\mathcal{E}_{\text{нх}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}})$  – народнохозяйственная эффективность, млн руб.;  $\mathcal{E}_o(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}})$  – отраслевая эффективность, млн руб.;  $tm(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}})$  – транспортная мобильность населения, тыс. пасс.-км на 1 чел. в год;  $\Delta t_{\text{д(сп)}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}})$  – сокращение времени доставки грузов, ч;  $\Delta t_{\text{д(nc)}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}})$  – сокращение времени доставки пассажиров, ч;  $\Delta t_{\text{ном}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}})$  – задержки в доставке грузов из-за отказов в работе объектов МТС, ч;  $K_z(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}})$  – коэффициенты готовности МТС к освоению потребного объема перевозок.

2. Из области эффективных стратегий развития МТС выбрать стратегию, для которой выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} & 3(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}) \rightarrow \min, \\ & \mathcal{E}_{\text{общ}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}) \geq \mathcal{E}_{\text{общ}}^{\text{зад}}, \\ & \mathcal{E}_{\text{нх}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}) \geq \mathcal{E}_{\text{нх}}^{\text{зад}}, \\ & \mathcal{E}_o(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}) \geq \mathcal{E}_o^{\text{зад}}, \\ & tm(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}) \geq tm^{\text{зад}}, \\ & \Delta t_{\text{д(сп)}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}) \geq \Delta t_{\text{д(сп)}}^{\text{зад}}, \\ & \Delta t_{\text{д(nc)}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}) \geq \Delta t_{\text{д(nc)}}^{\text{зад}}, \end{aligned}$$

$\Delta t_{\text{ном}}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}) \leq \Delta t_{\text{ном}}^{\text{зад}}$ ,  $\{K_z(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}})\} \geq K_z^{\text{зад}}$ , где  $\mathcal{E}_{\text{общ}}^{\text{зад}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{нх}}^{\text{зад}}$ ,  $\mathcal{E}_o^{\text{зад}}$ ,  $tm^{\text{зад}}$ ,  $\Delta t_{\text{д(сп)}}^{\text{зад}}$ ,  $\Delta t_{\text{д(nc)}}^{\text{зад}}$ ,  $\Delta t_{\text{ном}}^{\text{зад}}$ ,  $K_z^{\text{зад}}$  – заданные значения критериев.

3. Используя метод идеальной точки, из области эффективных стратегий развития МТС выбрать стратегию с наилучшим соотношением значений всех критериев цели:

$$\rho(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}}) = \sqrt{\sum_{i_c=1}^{n_c} \lambda_{i_c} R_{i_c}(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}})} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\rho(t, str_{i_{rs}}^{\text{MTN}})$  – обобщенный критерий, определяющий расстояние в  $n_c$ -мерном пространстве до некоторой «идеальной» точки с наилучшими значениями критериев цели;  $i_c$  –

порядковый номер критерия цели;  $n_c$  – количество критериев цели;  $\lambda_{i_c}$  – весовые коэффициенты (приоритеты), учитывающие значимость каждого критерия в общей оценке стратегии и назначаемые экспертной группой, при выполнении условий:

$$\sum_{i_c=1}^{n_c} \lambda_{i_c} = 1, \lambda_{i_c} > 0, \quad (2)$$

где  $R_{i_c}(t, str_{i_{rs}}^{MTN})$  – нормализованные критерии цели, приведенные к безразмерному виду на основании интервалов их максимального изменения и определяемые по следующим формулам:

– максимизируемые критерии цели –

$$\begin{aligned} & (\mathcal{E}_{общ}(t, str_{i_{rs}}^{MTN}), \mathcal{E}_{нх}(t, str_{i_{rs}}^{MTN}), \mathcal{E}_o(t, str_{i_{rs}}^{MTN}), \\ & tm(t, str_{i_{rs}}^{MTN}), \Delta t_{\partial(зр)}(t, str_{i_{rs}}^{MTN}), \Delta t_{\partial(нс)}(t, str_{i_{rs}}^{MTN}), \\ & K_z(t, str_{i_{rs}}^{MTN}) - \Delta t_{nom}(t, str_{i_{rs}}^{MTN})): \\ R_{i_c}(t, str_{i_{rs}}^{MTN}) &= \frac{\max R_{i_c}(t, str_{i_{rs}}^{MTN}) - R_{i_c}(t, str_{i_{rs}}^{MTN})}{\max R_{i_c}(t, str_{i_{rs}}^{MTN}) - \min R_{i_c}(t, str_{i_{rs}}^{MTN})}; \end{aligned} \quad (3)$$

– минимизируемый критерий цели ( $\mathcal{Z}(t, str_{i_{rs}}^{MTN})$ ):

$$R_{i_c}(t, str_{i_{rs}}^{MTN}) = \frac{R_{i_c}(t, str_{i_{rs}}^{MTN}) - \min R_{i_c}(t, str_{i_{rs}}^{MTN})}{\max R_{i_c}(t, str_{i_{rs}}^{MTN}) - \min R_{i_c}(t, str_{i_{rs}}^{MTN})}. \quad (4)$$

На основе предложенных трех вариантов математической постановки задачи принятия решения предлагается следующая методика принятия решения по этапному изменению облика и мощности МТС:

1. Используя информационную систему управления проектом развития МТС [27] и экспертные оценки влияния внешних (природно-климатических, экономических, политических, социальных) и внутренних (надежность функционирования объектов МТС, обеспеченность трудовыми ресурсами требуемого уровня квалификации, стоимость мониторинга программ и мероприятий по изменению облика и мощности объектов МТС) факторов на развитие МТС, определяются вероятности реализации расчетных случаев и выбирается ОЭС:

–  $Str_{i_{rs}}^{MTN}(t)^*$  – если будет выявлен расчетный случай  $i_{rs}^*$ , который будет иметь высокую вероятность реализации по сравнению с другими;

–  $\bigcup_{i_{rs} \in RS} Str_{i_{rs}}^{MTN}(t)^*$ ,  $RS = \{RS_{i_{rs}} | i_{rs} = \overline{1, n_{rs}}\}$  – если вероятности реализации расчетных случаев близки;

$$- \bigcap_{i_{rs} \in RS} Str_{i_{rs}}^{MTN}(t)^* \neq \emptyset, RS = \{RS_{i_{rs}} | i_{rs} = \overline{1, n_{rs}}\} -$$

если вероятности реализации расчетных случаев близки и множество эффективных стратегий, обеспечивающих освоение потребных объемов перевозок в заданных расчетных случаях, не являются пустыми.

2. Выбирают вариант математической постановки задачи.

3. Если выбран первый или второй вариант, то для принятия решения используют модифицированный метод динамического программирования – обобщенный алгоритм Кеттеля [33], с помощью которого формируется полное множество Парето-оптимальных решений, являющихся основой для выбора наилучшей стратегии этапного изменения облика и мощности МТС. Для этого выполняют следующие действия:

– ранжируют критерии цели;

– определяют для каждой стратегии ОЭС значения критериев цели с первым и вторым уровнями приоритета;

– применяя алгоритм Кеттеля, строят доминирующую последовательность стратегий, исключая неконкурентоспособные стратегии по критериям первого и второго уровней приоритета;

– для оставшихся стратегий определяют значения критерия цели следующего уровня приоритета и повторяют предыдущий пункт с учетом данного критерия;

– действия предыдущего пункта последовательно выполняют для каждого следующего по приоритету критерия цели и, таким образом, применив последний критерий по приоритету, получают доминирующую последовательность стратегий для принятия решения;

– из полученной доминирующей последовательности стратегий принимают решение, удовлетворяющее условиям выбранной математической постановки задачи.

4. Если выбран третий вариант, то выполняют следующие действия:

– определяют весовые коэффициенты критериев цели с учетом условия (2), вычисляемых для всей МТС и отдельно для входящих в нее коридоров.

– для всех стратегий ОЭС вычисляют значения критериев цели и по (3) и (4), определяют их нормализованные значения;

– рассчитав по (1) обобщенный критерий, выполняют по нему ранжирование стратегий.

– из полученной последовательности выбирают стратегию с минимальным обобщенным критерием, а также стратегии, имеющие значения критерия близкие к минимальному.

Блок-схема предложенной методики представлена (рис. 1).

При работе ЛПП с областью эффективных стратегий развития МТС для наглядной визуализации значений критериев авторы рекомендуют один из компонентов сбалансированной системы показателей – «приборную панель» ЛПП, один из ее примеров приведен на рис. 2.



Рис. 1. Блок-схема методики принятия решения по этапному изменению облика и мощности мультимодальной транспортной сети

Fig. 1. Decision-making scheme for gradual change in the appearance and capacity of a multimodal transport network

Приоритет	Показатели		Стратегии развития МТС						
	Наименование	Заданные усл.		17	16	15	...	11	...
		min	max						
1	Инвестиции в развитие МТС, млрд руб.		993	592,362	895,244	730,565		693,720	
2	Общественная эффективность, млрд руб.		18,00	1782	1676	1568		1325	
3	Народнохозяйственная эффективность, млрд руб.		1200	1139	1051	905		737	
4	Отраслевая эффективность, млрд руб.		-100	-92,362	-85,244	-70,565		-64,720	
5	Коэффициент готовности МТС к освоению потребного объема перевозок	0,956		0,981	0,980	0,977		0,968	
6	Транспортная мобильность населения, тыс. пасс.-км на 1 человека в год	14		16,8	16,0	15,3		14,6	
7	Задержки в доставке грузов из-за отказов в работе объектов МТС, часы	15,000		9445	9859	12224		14961	
8	Сокращение времени доставки грузов, часы	24		32	48	39		26	
9	Сокращение времени доставки пассажиров, часы	36		62	54	48		40	

Рис. 2. Пример «приборной панели» для принятия решений по развитию мультимодальной транспортной сети

Fig. 2. An example of a decision-making ‘dash panel’ for the development of the multi-modal transport network

**Заключение**

Предложенная методика принятия решений по этапному изменению облика и мощности МТС является инструментом методологии, с помощью которого ЛПР выбирает из сформированной ОЭС развития МТС наилучшую стратегию. ЛПР имеет возможность учесть неопределенность факторов, влияющих на принятие решения. Выбор наилучшей стратегии осуществляется, по многокритериальной оценке, эффективности стратегий с учетом социально-экономических последствий их реализации для

общества, экономики, транспортной отрасли на основе сбалансированной системы показателей.

В качестве перспектив практической реализации методологии авторы предлагают ее использовать для формирования и развития региональной МТС Дальнего Востока, Сибири и Арктической зоны России с учетом сценариев социально-экономического развития страны, ее регионов, обозначенных в Стратегии, а также конъюнктуры на мировых рынках экспортного минерального сырья и международной геополитической ситуации [1, 34, 35].

**Список литературы**

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 11 июня 2014 г. № 1032-р. 2014. 495 с.
2. Свинцов Е.С. Регионально-транспортные исследования в современных условиях. М.: Маршрут, 2005. 301 с.
3. Цветков В.А., Зоидов К.Х., Медков А.А. Формирование новой эволюционной модели транспортно-коммуникационного взаимодействия России и Китая. М.: ЦЭМИ РАН, 2013. 231 с.
4. Цветков В.А., Зоидов К.Х., Медков А.А. О возможности и целесообразности организации транзита через Россию грузов между странами Тихоокеанского региона и Европы. М.: Депонент Соционет, 2013. 50 с.
5. Сазонов С.Л., Кудрявцев Е.С., У Цзы. Транспортная составляющая проектов сопряжения Европейского экономического союза и «экономического пояса шелкового пути» // Проблемы Дальнего Востока. 2015. № 2. С. 47–58.
6. Чумляков К.С., Чумлякова Д.В. Национальный транзитный потенциал в системе международных транспортных коридоров // Бюллетень транспортной информации. 2015. № 11(245). С. 8–13.
7. Быков Ю.А., Васильев А.Б., Фадеева В.А. Прогнозирование развития транспортных коридоров России в сообщении Европа – Азия // Транспорт Урала. 2015. № 1(44). С. 53–56.
8. Vykov Y.A., Buchkin V.A., Fadeeva V.A., Guskova M.F. Prospects for the development of railway transport corridors between Europe and Asia and the methodology for their multicriteria evaluation // Proceedings of the 2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2017. 2017. С. 66–68.
9. Подвербный В.А., Холодов П.Н., Титов К.М. Методы принятия проектных решений в строительстве. Иркутск: ИрГУПС, 2010. 72 с.
10. Холодов П.Н. Выбор оптимального решения в проектировании железных дорог на основе многокритериальной оценки: дис. канд. техн. наук: 05.22.06 / Холодов Пётр Николаевич. Хабаровск: ДВГУПС, 166 с.
11. Перельгина А.А., Подвербный В.А. Принятие решения по выбору варианта трассы на горно-перевальном участке Восточно-Сибирской железной дороги // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 2 (86). С. 33–44.
12. 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.
13. Гавриленков А.В. Теоретические основы проектирования скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралей. Хабаровск: ДВГУПС, 2004. 213 с.
14. Подвербный В.А. Выбор варианта железной дороги на основе критерия нечеткой полезности // Транспортное строительство. 2000. № 7. С. 10–13.
15. Подвербный В.А. Выбор проектного решения в нечеткой среде на основе индексов ранжирования // Железнодорожный транспорт. Серия «Строительство. Проектирование»: ЭИ / ЦНИИТЭИ МПС. 2000. Вып. 2–3. С. 34–47.
16. Быков Ю.А., Сидраков А.А., Фадеева В.А. Формирование множества вариантов направления проектируемых железных дорог и оценка их конкурентоспособности // Качество. Инновации. Образование. 2020. № 1 (165). С. 44–49.
17. Drożdziel P. Prospects of international freight transport in the East-West direction / P. Drożdziel, B. Buková, E. Brumerčíková // Transport Problems. 2015. Vol. 10, no 4. pp. 5–13.
18. Zhang J, Liao F, Arentze T, Timmermans H 2011 Procedia Computer Science 5, pp. 912–919.
19. Zhang J, Liao F, Arentze T, Timmermans H 2011 Procedia Social and Behavioral Sciences 20, pp. 313–322.
20. Regmi M, Hanaoka S. Research in Transportation Business & Management 5, 2005. Pp. 27–37.
21. Reis V, Meier J, Pace G, Palacin R 2013 Research in Transportation Economics 41 (1), pp. 17–30.
22. Drożdziel P, Buková B, Brumerčíková E 2015 Transport Problems 10 (4), pp. 5–13.
23. Wang Y, Yeo G-T 2016 The Asian Journal of Shipping and Logistics 32 (1), pp. 41–47.
24. Dib O, Manier M-A, Moalic L, Caminada A 2017 Transportation Research Procedia 20 134–143.
25. Oberg M, Nilsson K, Johansson C. Transportation Research Procedia 25, 2017. pp. 3694–3702.
26. Stoilova S, Munier N, Kendra M, Skrúčaný T 2020 Sustainability, 12(4), 1482.
27. Нестерова Н.С. Методология проектирования мультимодальной транспортной сети: дис. ... д-ра техн. наук, специальность: 05.22.01 / Нестерова Наталья Станиславовна. Хабаровск, ДВГУПС, 2017. 387 с.
28. Nesterova N.S., Goncharuk S.M., Anisimov V.A., Anisimov A.V., Shvartsfeld V.S. Set-theoretic Model of Strategies of Development for Objects of Multimodal Transport Network. Procedia Engineering, Vol. 165 (2016), pp. 1547–1555.

29. Нестерова Н.С., Анисимов В.А. Формирование множества возможных стратегий этапного изменения облика и мощности объектов мультимодальной транспортной сети // Известия ПГУПС. 2019. Т.16, вып. 3. С. 329–338. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-329-338.

30. Natalia S. Nesterova, Sergey M. Goncharuk, Vladimir A. Anisimov, Aleksandr V. Anisimov. A Mathematical Model of the Estimated Cases for Designing a Multimodal Transport Network // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Т. 692. С. 177–183. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_19).

31. Nesterova N.S., Anisimov V.A. Effective strategies for multimodal transportation network // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGRO-MASH 2019. Vol. 403. С. 012204. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012204.

32. Нестерова Н.С., Анисимов В.А. Сбалансированная система показателей для оценки стратегий развития мультимодальной транспортной сети // Известия ПГУПС. 2016. Т. 13, вып. 2 (47). С. 197–205.

33. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. М.: Наука, 1984. 328 с.

34. Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие арктической зоны Российской Федерации» (утв. распоряжением Правительства РФ от 21 апреля 2014 г. № 336).

35. Anisimov V.A., Bogdanova L.A., Morozova O. S., Shkurnikov S.V., Nesterova N.S. Potential of the railways of the multimodal transport network of the Eastern Siberia and Far East of Russia // The 2020 International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2020) 11th-13th November 2020, Irkutsk, Russia, 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. Vol. 1151, Pp. 012028.

## References

1. Transportnaya strategiya Rossijskoy Federatsii do 2030 goda [Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 (the decree of the Government of the Russian Federation no 1032-R of June 11, 2014)]. 2014. 495 p.

2. Svintsov E.S. Regional'no-transportnye issledovaniya v sovremennykh usloviyakh [Regional transport research in modern conditions]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 301 p.

3. Tsvetkov V.A., Zoidov K.Kh., Medkov A.A. Formirovanie novoy evolyutsionnoy modeli transportno-kommunikatsionnogo vzaimodeystviya Rossii i Kitaya [Formation of a new evolutionary model of transport and communication interaction between Russia and China]. Moscow: TSEMI RAN Publ., 2013. 231 p.

4. Tsvetkov V.A., Zoidov K.Kh., Medkov A.A. O vozmozhnosti i tselesoobraznosti organizatsii cherez Rossiyu gruzov mezhdru stranami Tikhookeanskogo regiona i Evropy [About the possibility and expediency of organizing the cargo transit through Russia between the countries of the Pacific region and Europe]. Moscow: Deponent Sopionet Publ., 2013. 50 p.

5. Sazonov S.L., Kudryavtsev E.S., U Tsy. Transportnaya sostavlyayuschaya proektov sopryazheniya Evropeiskogo ekonomicheskogo soyuza i «ekonomicheskogo poyasa shelkovogo puti» [Transport component of the projects of coupling the European Economic Union and the «Silk Road Economic Belt»]. *Problemy Dal'nego Vostoka [Problems of the Far East]*, 2015, No. 2, pp. 47–58.

6. Chumlyakov K.S., Chumlyakova D.V. Natsional'niy tranzitnyy potentsial v sisteme mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [National transit potential in the system of international transport corridors]. *Byulleten' transportnoj informatsii [Bulletin of transport information]*, 2015, No. 11(245), pp. 8–13.

7. Bykov Yu.A., Vasiliev A.B., Fadeeva V.A. Prognozirovaniye razvitiya transportnykh koridorov Rossii v soobshhenii Evropa – Aziya [Prediction the development of transport corridors of Russia in the transport connection Europe-Asia]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2015, No. 1(44), pp. 53–56.

8. Bykov Y.A., Buchkin V.A., Fadeeva V.A., Guskova M.F. Prospects for the development of railway transport corridors between Europe and Asia and the methodology for their multicriteria evaluation. *Proceedings of the 2017 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", IT and QM and IS 2017*. 2017. pp. 66–68.

9. Podverbny V.A., Kholodov P.N., Titov K.M. Metody prinyatiya proektnykh resheniy v stroitel'stve [Methods of making design decisions in construction]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2010. 72 p.

10. Kholodov P.N. Vybor optimal'nogo resheniya v proektirovanii zheleznykh dorog na osnove mnogokriterial'noy otsenki: dis. ... kan. tekhn. nauk [Choosing the optimal solution in the design of railways based on a multi-criteria assessment: Ph.D. (Engineering) diss.]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2012. 166 p.

11. Perelygina A.A., Podverbnyj V.A. Prinyatie resheniya po vyboru varianta trassy na gorno-pereval'nom uchastke Vostochno-Sibirskoy zheleznoy dorogi [Making a decision on the choice of the route option on the mountain-perevalny section of the East Siberian Railway]. *Vestnik transporta Povolzh'ya [Bulletin of Transport of the Volga region]*, 2021, No. 2 (86), pp. 33–44.

12. Podverbnyj V.A., Perelygina A.A. Prinyatie resheniya po vyboru tipa ukrepleniya vodootvodnykh i nagornykh kanav na osnove metoda ideal'noy 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.

13. Gavrilentsov A.V. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya skorostnykh i vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralей [Theoretical foundations of designing high-speed railway lines]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2004. 213 p.

14. Podverbnyj V.A. Vybor varianta zheleznoy dorogi na osnove kriteriya nechetkoy poleznosti [Choosing a railway alternative based on the criterion of fuzzy utility]. *Transportnoe stroitel'stvo [Transport construction]*, 2000, No. 7, pp. 10–13.

15. Podverbnyj V.A. Vybor proektnogo resheniya v nechetkoy srede na osnove indeksov ranzhirovaniya [The choice of a design solution in a fuzzy environment based on ranking indices]. *Zheleznodorozhnyy transport. Seriya «Stroitel'stvo. Proektirovaniye»: EHI / TSNITEHI MPS [Railway transport. The series «Construction. Designing»: EI / TSNITEI MPS]*, 2000, issue 2-3, pp. 34–47.

16. Bykov Yu.A., Sidrakov A.A., Fadeeva V.A. Formirovaniye mnozhestva variantov napravleniya proektiruemykh zheleznnykh dorog i otsenka ikh konkurentosposobnosti [Formation of a set of variants of the direction of the projected railways and assessment of their competitiveness]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie [Quality. Innovations. Education]*. 2020, No. 1(165), pp. 44–49.
17. Drożdźiel P., Buková B., Brumerčíková E. Prospects of international freight transport in the East-West direction. *Transport Problems*. 2015. Vol. 10, No. 4, pp. 5–13.
18. Zhang J, Liao F, Arentze T, Timmermans H 2011 *Procedia Computer Science* 5, pp. 912–919.
19. Zhang J, Liao F, Arentze T, Timmermans H 2011 *Procedia Social and Behavioral Sciences* 20, pp. 313–322.
20. Regmi M, Hanaoka S 2012 *Research in Transportation Business & Management* 5, pp. 27–37.
21. Reis V, Meier J, Pace G, Palacin R 2013 *Research in Transportation Economics* 41 (1), pp. 17–30.
22. Drożdźiel P, Buková B, Brumerčíková E 2015 *Transport Problems* 10 (4), pp. 5–13.
23. Wang Y, Yeo G-T 2016 *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 32 (1), pp. 41–47.
24. Dib O, Manier M-A, Moalic L, Caminada A 2017 *Transportation Research Procedia* 20, 134–143.
25. Oberg M, Nilsson K, Johansson C. *Transportation Research Procedia* 25, 2017. Pp. 3694–3702.
26. Stoilova S, Munier N, Kendra M, Skrúcaný T 2020 *Sustainability*, 12(4), 1482.
27. Nesterova N.S. Metodologiya proektirovaniya mul'timodal'noj transportnoj seti: dis. ... dok. tekhn. nauk [Methodology of designing a multimodal transport network: D. Sc. (Engineering) diss.]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2017. 387 p.
28. Nesterova N.S., Goncharuk S.M., Anisimov V.A., Anisimov A.V., Shvartsfeld V.S. Set-theoretic Model of Strategies of Development for Objects of Multimodal Transport Network. *Procedia Engineering*, 2016. Vol. 165, pp. 1547–1555.
29. Nesterova N.S., Anisimov V.A. Formirovaniye mnozhestva vozmozhnykh strategiy ehtapnogo izmeneniya oblika i moshhnosti ob"ektov mul'timodal'noj transportnoj seti [The formation of a set of possible strategies for stage-by-stage changes in the appearance and power of objects of a multimodal transport network]. *Izvestiya PGUPS [Bulletin of PGUPS]*. 2019. Vol. 16, issue 3, pp. 329–338. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-329-338.
30. Nesterova N.S., Goncharuk S.M., Anisimov V.A., Anisimov A.V. A Mathematical Model of the Estimated Cases for Designing a Multimodal Transport Network. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. Vol. 692. pp. 177–183. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_19).
31. Nesterova N.S., Anisimov V.A. Effective strategies for multimodal transportation network. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGRO-MASH 2019*. Vol. 403. pp. 012204. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012204.
32. Nesterova N.S., Anisimov A.V. Sbalansirovannaya sistema pokazatelye dlya otsenki strategiy razvitiya mul'timodal'noy transportnoj seti [Balanced scorecard for evaluation of multimodal transportation network development strategies]. *Izvestiya PGUPS [Bulletin of PGUPS]*. 2016. Vol. 13, issue 2(47), pp. 197–205.
33. Barlow R., Proshan F. Statisticheskaya teoriya nadezhnosti i ispytaniya na bezotkaznost' [Statistical theory of reliability and reliability tests]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 328 p.
34. Gosudarstvennaya programma Rossijskoj Federatsii «Sotsial'no-ehkonomicheskoe razvitie arkticheskoy zony Rossijskoj Federatsii» [State program of the Russian Federation «Socio-economic development of the Arctic zone of the Russian Federation»]. Enacted by Russian Federation government decree no 336 on April 21, 2014.
35. Anisimov V A, Bogdanova LA, Morozova O.S., Shkurnikov S.V., Nesterova N.S. Potential of the railways of the multimodal transport network of the Eastern Siberia and Far East of Russia. *The 2020 International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2020) 11th-13th November 2020, Irkutsk, Russia, 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* Volume 1151, pp. 012028.

### Информация об авторах

**Нестерова Наталья Станиславовна** – д-р. техн. наук, профессор кафедры изысканий и проектирования железных и автомобильных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: mer-maid2@yandex.ru.

**Анисимов Владимир Александрович** – д-р. техн. наук, доцент, профессор кафедры изысканий и проектирования железных дорог, Петербургский государственный университет Путей Сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, e-mail: anisvl@mail.ru.

### Information about the authors

**Natalya S. Nesterova** – Doctor of Engineering Sciences, The Full Professor of the Department of Survey and Design of Railways and Highways, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: mer-maid2@yandex.ru.

**Vladimir A. Anisimov** – Doctor of Engineering Science, Associate Professor of the Department of Survey and Design of Railways, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, e-mail: anisvl@mail.ru.

## Система экстремального управления вспомогательным приводом электровозов

С. А. Шухарев✉, А. В. Гуляев

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

✉ shuharevsa@gmail.com

### Резюме

Одним из путей повышения энергетической эффективности асинхронного двигателя является применение системы экстремального управления. Повышение энергетической эффективности достигается за счет уменьшения потребляемого тока двигателем до экстремально низких значений изменением величины потокосцепления ротора. Целью работы является повышение энергоэффективности системы векторного управления асинхронного двигателя за счет оптимизации задания потокосцепления ротора. Оптимальное значение потокосцепления определяется в соответствии с критерием минимального потребляемого тока статора в зависимости от заданного значения электромагнитного момента на валу двигателя. Недостатком классической системы экстремального регулирования является низкое быстродействие за счет большого значения времени поиска точки экстремума. Таким образом, классические поисковые системы применимы в установившихся режимах работы. В случае отклонения параметров двигателя или изменения режима его работы, необходимо осуществлять новый поиск экстремума при каждом изменении, что невозможно из-за низкого быстродействия. В этой связи применение классических экстремальных регуляторов ограничено. Для устранения этого недостатка предлагается использовать систему экстремального управления с изменяющимся шагом в процессе работы регулятора. При этом система управления обеспечивает повышение энергетических показателей асинхронного двигателя как в номинальном, так и в отличных от номинального режимах работы. Предложенный алгоритм регулирования целесообразно применять в приводе вспомогательных машин электровоза. В работе использовался типовой асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4А225 М4 У2, установленный в приводе мотор-вентилятора ВЛ85. Предлагаемая система экстремального управления позволяет уменьшить электрические потери в двигателе во всех режимах его работы. Для рассмотренного двигателя 4А225 М4 У2 величину тока статора удалось сократить на 15 %, а время поиска на 40 % по сравнению с классическим методом экстремального регулирования с постоянным шагом поиска.

### Ключевые слова

асинхронный двигатель, имитационное моделирование, векторное управление, вращающаяся система координат, экстремальное управление, MatLab / Simulink

### Для цитирования

Шухарев С. А. Система экстремального управления вспомогательным приводом электровозов / С. А. Шухарев, А. В. Гуляев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 68–77. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).68-77

### Информация о статье

поступила в редакцию: 12.09.2021, поступила после рецензирования: 21.09.2021, принята к публикации: 07.10.2021

## Extreme control system of auxiliary drive of electric locomotives

S. A. Shukharev✉, A. V. Gulyaev

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ shuharevsa@gmail.com

### Abstract

One of the ways to increase the energy efficiency of an induction motor is the use of an extreme control system. The increase in energy efficiency is achieved by reducing the power consumed by the motor to extremely low values by changing the value of the rotor flux linkage. The purpose of the work is to increase the energy efficiency of the vector control system of an induction motor by optimizing the setting of the rotor flux linkage. The flux linkage optimum value is determined in accordance with the criterion of the minimum consumed stator current depending on the set value of the electromagnetic torque on the motor shaft. The disadvantage of classical systems of extreme regulation is low performance due to the large value of the search time for the extremum point. Thus, classical search engines are applicable in established operating modes. In the event of a deviation in the parameters of the engine or a change in its operating mode, it is necessary to carry out a new search for an extremum with each change, which is impossible due to low speed of performance. In this regard, the use of classical extremal controllers is limited. To eliminate this drawback, it is proposed to use an extreme control system with a variable step during the operation of the regulator. Herewith, the control system provides an increase in the energy performance of the asynchronous motor both in the nomi-

nal and non-nominal operating modes. It is advisable to use the proposed regulation algorithm in the drive of auxiliary machines of an electric locomotive. A typical asynchronous motor with a squirrel-cage rotor of the 4A225 M4 U2 type, installed in the VL85 motor-fan drive, was used in the work. The proposed extreme control system allows to reduce power losses in the engine in all modes of its operation. For the motor 4A225 M4 U2 considered in the work, the stator current was reduced by 15 %, and the search time by 40% in comparison with the classical method of extreme regulation with a constant search step.

### Keywords

asynchronous motor, simulation, vector control, rotating coordinate system, extreme control, MatLab / Simulink

### For citation

Shukharev S. A., Gulyaev A. V. Sistema ekstremal'nogo upravleniya vspomogatel'nym privodom ehlektrovozov [Extreme control system of auxiliary drive of electric locomotives]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 68–77. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).68-77

### Article Info

Received: 12.09.2021, Revised: 21.09.2021, Accepted: 07.10.2021

### Введение

Эксплуатация электровозов переменного тока, имеющих систему вспомогательных машин на основе асинхронных двигателей трехфазного переменного тока, сопровождается невысокой энергетической эффективностью, выраженной в низком коэффициенте мощности, достаточно высоким коэффициентом искажения синусоидальности питающего напряжения на первичной обмотке тягового трансформатора электровоза, а также высоким коэффициентом несимметрии трехфазного питающего напряжения асинхронных двигателей вспомогательных машин. Известны различные пути повышения эффективности работы асинхронных двигателей вспомогательных машин в виде снижения коэффициента искажения в обмотке собственных нужд и коэффициента несимметрии в трехфазной системе питания асинхронных двигателей. Коэффициенты искажения синусоидальности и несимметрии влияют на повышение энергетической эффективности, но это не решает в полной мере задачу повышения энергетической эффективности асинхронного двигателя. Одним из путей повышения энергетической эффективности является применение экстремального регулятора для управления асинхронным двигателем. Повышение энергетической эффективности достигается за счет уменьшения потребляемого тока двигателем до экстремально низких значений и изменением величины потокосцепления ротора.

Целью работы является повышение энергоэффективности системы векторного управления асинхронного двигателя за счет оптимизации задания потокосцепления ротора  $\psi_R$ . Оптимальное значение потокосцепления определяется по критерию минимального потребляемого

тока статора  $i_S$  в зависимости от заданного значения электромагнитного момента  $M_{em}$  на валу двигателя.

Недостатком всех поисковых систем управления является их низкое быстродействие за счет большого значения времени регулирования, т. е. поиска точки экстремума. Таким образом, классические поисковые системы применимы в установившихся режимах работы. При этом в динамических режимах работы в результате отклонения параметров двигателя или изменения режима его работы, необходимо осуществлять новый поиск экстремума при каждом изменении, что невозможно из-за низкого быстродействия. В этой связи применение классических экстремальных регуляторов ограничено. Для устранения этого недостатка предлагается использовать систему экстремального управления с изменяющимся шагом в процессе работы регулятора. При этом система управления обеспечивает повышение энергетических показателей асинхронного двигателя как в номинальном, так и в отличных от номинального режимах работы. Предложенный алгоритм регулирования целесообразно применять в приводе вспомогательных машин электровоза.

### Уравнения асинхронного двигателя во вращающейся системе координат

Современные системы управления асинхронными двигателями построены на представлении электромагнитных процессов в векторной форме, что является практически стандартом управления [1]. Такой принцип управления позволяет эффективно управлять двигателем как в стационарных, так и в переходных режимах работы, обеспечивая наилучшие показатели качества управления по сравнению со

скалярным управлением. Система уравнений (1) является математической основой для создания электрической составляющей имитационной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором [2]:

$$\begin{aligned} u_{sd} &= R_{equ} (pT_{equ} + 1) i_{sd} - L_{equ} \omega_1 i_{sq} - R_2' \frac{L_m}{L_2} \Psi_R; \\ u_{sq} &= R_{equ} (pT_{equ} + 1) i_{sq} + L_{equ} \omega_1 i_{sd} - K_2 \Psi_R \Omega z_p; \\ \Psi_R &= \frac{L_m}{T_2 p + 1} i_{sd}; \\ M_{em} &= \frac{3}{2} z_p K_2 \Psi_R i_{sq}. \end{aligned} \quad (1)$$

В уравнениях обозначено:

– эквивалентное сопротивление –

$$R_{экв} = R_S + K_2^2 R_R';$$

– коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора –

$$K_1 = L_m / L_S; \quad K_2 = L_m / L_R';$$

– эквивалентная индуктивность –

$$L_{экв} = L_S (1 - K_1 \cdot K_2);$$

– эквивалентная постоянная времени –

$$T_{экв} = L_{экв} / R_{экв}.$$

Частота вращения ротора  $\omega$  в модели двигателя может быть выражена через величину механической угловой скорости вращения ротора  $\Omega$ :  $\omega = z_p \Omega$ , где  $z_p$  – число пар полюсов двигателя.

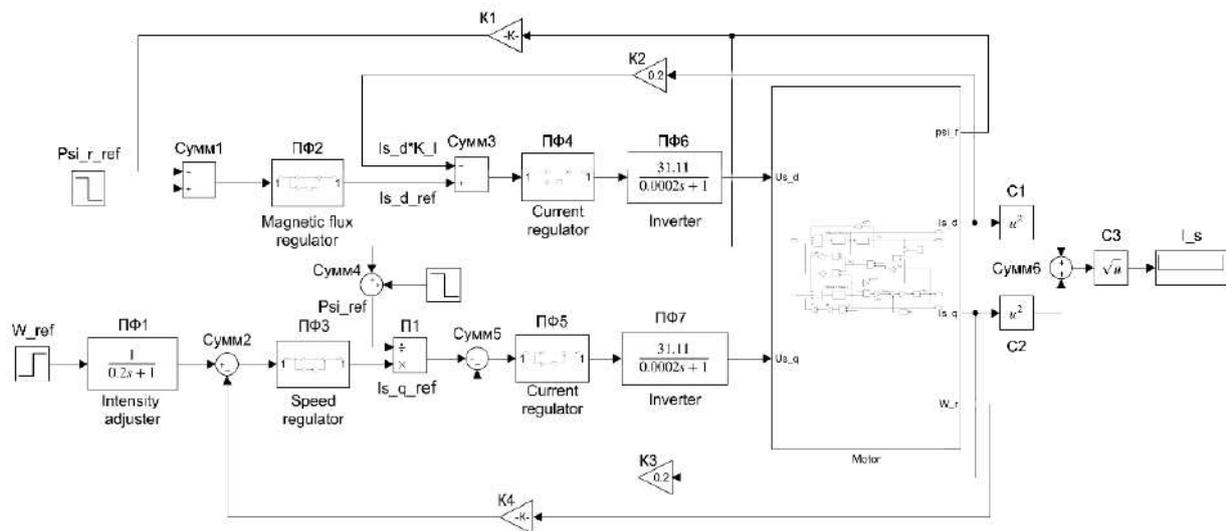
Уравнение электромеханического равновесия в модели двигателя представляется в виде:

$$M_{em} - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

где  $M_c$  – момент сопротивления на валу двигателя;  $J$  – момент инерции, приведенный к валу двигателя [3].

Для реализации векторного управления математическое описание модели двигателя (1) дополним двумя управляющими контурами: по потокоцеплению ротора  $\Psi_R$  и скорости вращения двигателя  $\omega_R$  с внутренними подчиненными контурами регулирования по току. Структурная схема асинхронного двигателя с векторным управлением показана на рис. 1, в левой ее части представлены указанные контуры регулирования.

Схема векторного управления двигателем состоит из двух контуров регулирования магнитного потока и угловой скорости, каждый из которых представляет собой классическую схему регулирования по отклонению или по ошибке. Ток в контурах создается с помощью инвертора напряжения, представленного идеальным апериодическим звеном первого порядка Inverter. Необходимые для моделирования значения потока ротора ( $\Psi_{r\_ref}$ ) и скорости ( $W\_ref$ ) задаются с помощью задатчиков ( $\Psi_{r\_ref}$ ) и ( $W\_ref$ ). Сравнение заданного и



**Рис. 1.** Структурная схема двигателя с векторным управлением в пакете Matlab / Simulink: Сумм1–Сумм6 – сумматоры; К1–К4 – усилители; П1 – множитель; ПФ1–ПФ7 – блоки передаточной функции; C1–C3 – блоки возведения в степень; Motor – модель двигателя

**Fig. 1.** Structural scheme of the vector controlled engine in the Matlab/Simulink package: Сумм1–Сумм6 – adders, К1–К4 – amplifiers, П1 – multiplier, ПФ1–ПФ7 – transfer function block, C1–C3 – exponentiation blocks, Motor – engine model

фактического значений потокосцепления и скорости осуществляется сумматорами Сумм1 и Сумм2. Регулирование величины потокосцепления и скорости осуществляется регуляторами потока (Magnetic flux regulator) и скорости (Speed regulator), а также регуляторами тока (Current regulator), представляющими собой пропорционально-интегрирующие (ПИ) регуляторы. Момент на валу двигателя создается за счет изменения момента сопротивления блоком константы  $M_c$  в модели двигателя Motor. Действующее значение тока статора  $i_s$  определяется проекциями тока на оси  $d$ - $q$  и рассчитывается в соответствии с выражением:

$$i_s = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2}.$$

Узел для расчета тока  $i_s$  представлен в правой части схемы и состоит из двух блоков возведения в степень С1, С2 и блока вычисления квадратного корня С3.

Классический закон векторного управления асинхронным двигателем предполагает поддержание постоянной величины потокосцепления. Однако в процессе регулирования возможно изменение величины  $\psi_R$  с периодом времени  $T$ , значительно превышающим постоянную времени  $\tau = (L_{\sigma S} + L_m)/R_S$  статорной цепи двигателя. В этом случае потокосцепление можно считать условно постоянным [4]. С этих позиций будем проектировать работу системы экстремального управления двигателем [5].

### Классическая система экстремального управления

Система экстремального регулирования (управления) СЭР [6] предназначена для нахождения

максимума или минимума показателя качества объекта и поддержания этого показателя на экстремальном уровне. В работе показателем качества выбран ток статора  $I_S$  асинхронного двигателя вспомогательного привода электроваза. В качестве управляющего воздействия на систему управления асинхронным двигателем выступает потокосцепление ротора  $\psi_R$ . Пример работы классической системы экстремального регулирования приведен на рис. 2.

В левой части рис. 2 приведена кривая функции качества  $I_S = f(\psi_R)$ , минимум значения которой находится в точке А. В правой части приведена ступенчатая кривая, показывающая процесс поиска минимального значения тока статора  $I_S$ , обозначенная цифрами 0–11. Процесс поиска минимального значения тока статора начинается в момент времени  $t = 0$  со значением тока  $I_{S(0)}$ . На первом шаге поиска экстремальная система управления формирует некоторый уровень потокосцепления ротора, отличающегося от предыдущего значения на величину шага  $\Delta\psi_{R(1)}$ . Этому значению соответствует новая величина тока статора  $I_{S(1)}$ . Проверка правильности выбранного направления поиска осуществляется путем сравнения разницы между предыдущим  $I_{S(0)}$  и текущим  $I_{S(1)}$  значениями токов  $\Delta I_{S(1)} = I_{S(0)} - I_{S(1)}$ . Так как полученная разница  $\Delta I_{S(1)}$  больше ширины зоны нечувствительности  $\delta$ , то направление поиска выбрано верно, и следующий шаг поиска будет выполняться с тем же значением  $\Delta\psi_{R(1)} = \Delta\psi_{R(2)}$ . До шестого шага (точка 6) процесс поиска продолжается по приведенному алгоритму.

На шестом шаге поиска разница токов статора  $\Delta I_{S(6)}$  между предыдущим  $I_{S(5)}$  и текущим

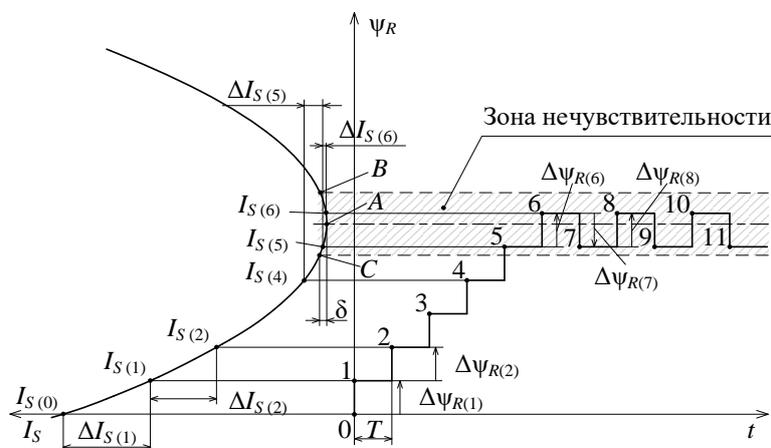
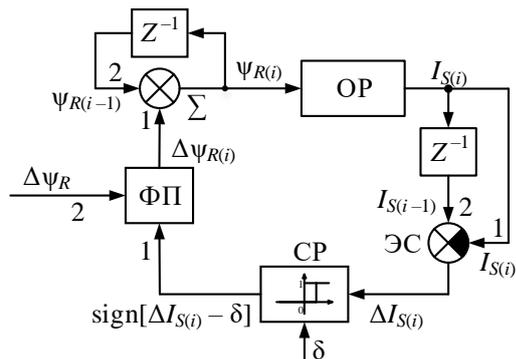


Рис. 2. Поиск минимального значения тока статора  $I_S$  системой экстремального управления  
Fig. 2. Search for minimal stator current value  $I_S$  by the extreme control system

$I_{S(6)}$  значениями становится меньше ширины зоны нечувствительности  $\delta$ . Это означает, что следующий седьмой шаг поиска необходимо выполнить в противоположном направлении по сравнению с шестым шагом, с величиной  $\Delta\psi_{R(7)} = -\Delta\psi_{R(6)}$ . Начиная с точки 7, осуществляется циклический поиск минимального значения тока статора первого рода [6].

На рис. 3 приведена структурная схема системы экстремального управления.



**Рис. 3.** Структурная схема системы экстремального управления  
**Fig. 3.** Structural scheme of the extreme control system

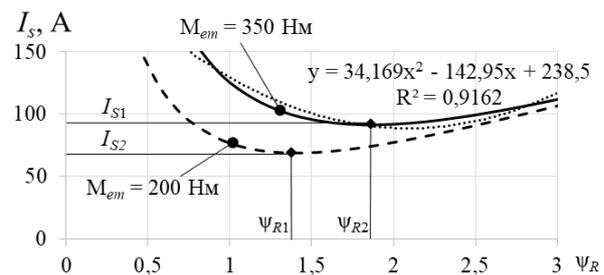
Структурная схема системы экстремального управления состоит из двух блоков временных задержек  $Z^{-1}$ , элемента сравнения (ЭС), сигнум-реле (СР), блока формирования приращения потокосцепления ротора (ФП) и сумматора  $\Sigma$ . Текущее значение показателя качества  $I_{S(i)}$  с выхода объекта регулирования поступает на вход блока задержки и на первый вход элемента сравнения. Элемент сравнения вычисляет разницу между предыдущим  $I_{S(i-1)}$  и текущим  $I_{S(i)}$ . Полученная разница  $\Delta I_{S(i)}$  поступает на вход блока СР и сравнивается с величиной зоны нечувствительности  $\delta$ . Выходной сигнал с СР поступает на первый вход блока ФП. В соответствии с заданным значением шага  $\Delta\psi_R$  на выходе блока формируется сигнал текущего шага  $\Delta\psi_{R(i)}$ . С помощью блока сумматора  $\Sigma$  и второго блока временной задержки  $Z^{-1}$  определяется текущее значение потокосцепления ротора  $\psi_{R(i)}$ . Текущее значение формируется на выходе сумматора в результате сложения величины шага  $\Delta\psi_{R(i)}$  и предыдущего  $\Delta\psi_{R(i-1)}$ , поступающего с выхода элемента задержки  $Z^{-1}$ .

Основным недостатком классической СЭР является длительность процесса нахождения

экстремума, которая определяется заданной постоянной величиной поискового шага  $\Delta\psi_R = const$ . Для устранения этого недостатка предложен способ определения  $\Delta\psi_R$  в процессе работы СЭР [7].

### Система экстремального управления с изменяющимся шагом

По результатам имитационного моделирования работы асинхронного двигателя типа 4А225 М4 У2 [8], установленного в приводе мотор-вентилятора ВЛ85, получены кривые  $I_S = f(\psi_R)$  (рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость тока статора от величины потокосцепления ротора  
**Fig. 4.** Dependence of the stator current on the rotor flux linkage value

На рисунке представлены кривые, соответствующие двум моментам сопротивления 350 и 200 Нм. Из анализа рисунка следует, что каждой кривой  $I_S = f(\psi_R)$  соответствует свое минимальное значение тока статора ( $I_{S1}$  и  $I_{S2}$ ) при отличающихся друг от друга величинах потокосцепления ( $\psi_{R1}$  и  $\psi_{R2}$ ). Таким образом, при различном моменте сопротивления необходимо задавать оптимальное значение потокосцепления ротора  $\psi_{R1}$  или  $\psi_{R2}$  для достижения минимума потребляемого тока.

Произведем анализ кривой  $I_S = f(\psi_R)$  при  $M_{em} = 350$  Нм, выполнив ее аппроксимацию полиномом второй степени:

$$I_S = a\psi_R^2 + a\psi_R + c, \quad (2)$$

где  $a$  – старший коэффициент полинома;  $b$  – второй коэффициент полинома;  $c$  – свободный член.

В результате аппроксимации кривой  $I_S = f(\psi_R)$  на рис. 4 получено значение коэффициента детерминации  $R^2 = 0,916$ , что свидетельствует о достаточности использования полинома второй степени. В соответствии с [9–11] значение поискового шага определяется как

$$\psi = \sqrt{\frac{\delta}{|a|}}. \quad (3)$$

Значение коэффициента  $a$  может быть получено путем дифференцирования функции качества  $I_S = f(\psi_R)$  при некотором значении потокосцепления ротора. Для определения неизвестного значения старшего коэффициента  $a$  произведем дифференцирование полинома (2):

$$I'_S = 2a\psi_R + b.$$

В полученном выражении, кроме искомого значения старшего коэффициента  $a$  полинома, необходимо также определить неизвестный коэффициент  $b$ . Принимаем, что для одной и той же функций  $I_S = f(\psi_R)$  значения коэффициентов  $a$  и  $b$  остаются постоянными. В этом случае вычислим производные тока статора  $I'_{S_1}$  и  $I'_{S_2}$  в соседних точках кривой  $I_S = f(\psi_R)$  при двух значениях потокосцепления ротора  $\psi_{R1}$  и  $\psi_{R2}$  взятых с шагом  $\Delta\psi_R$ :

$$I'_{S_1} = 2a\psi_{R_1} + b; I'_{S_2} = 2a\psi_{R_2} + b. \quad (4)$$

Выразим старшие коэффициенты  $a$  из (4):

$$a = \frac{b - I'_{S_1}}{2\psi_{R_1}}; a = \frac{b - I'_{S_2}}{2\psi_{R_2}}. \quad (5)$$

Приравняв между собой эти коэффициенты и выполняя нужные преобразования, получим:

$$\begin{aligned} a = \frac{b - I'_{S_1}}{2\psi_{R_1}} &= a = \frac{b - I'_{S_2}}{2\psi_{R_2}} \Rightarrow b(\psi_{R_2} - \psi_{R_1}) \Rightarrow \\ &\Rightarrow I'_{S_1}\psi_{R_2} - I'_{S_2}\psi_{R_1}. \end{aligned}$$

Заменяя разность потокосцеплений ротора  $\psi_{R2} - \psi_{R1}$  величиной  $\Delta\psi_R$ , получаем конечную формулу для расчета коэффициента  $b$ :

$$b = \frac{I'_{S_1}\psi_{R_2} - I'_{S_2}\psi_{R_1}}{\Delta\psi_R}. \quad (6)$$

В результате совместного решения уравнений (5) и (6), получаем искомое значение коэффициента  $a$ , которое определяется из выражения:

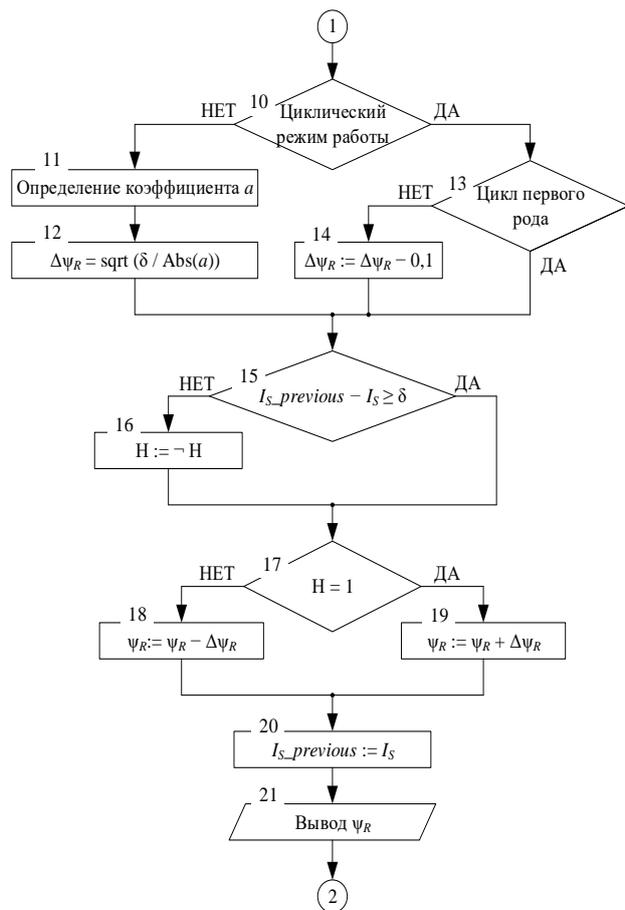
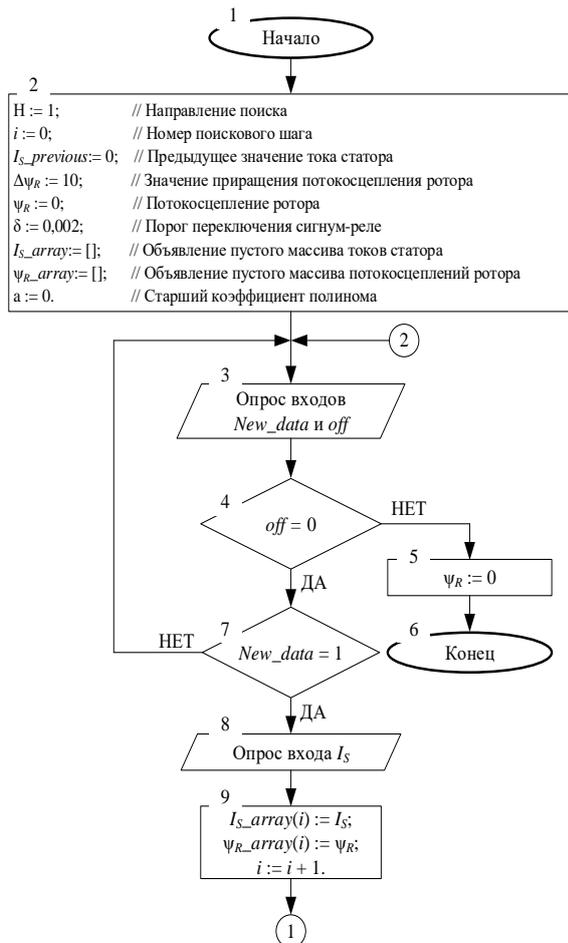


Рис. 5. Алгоритм работы системы экстремального управления  
 Fig. 5. Algorithm of the extreme control system operation

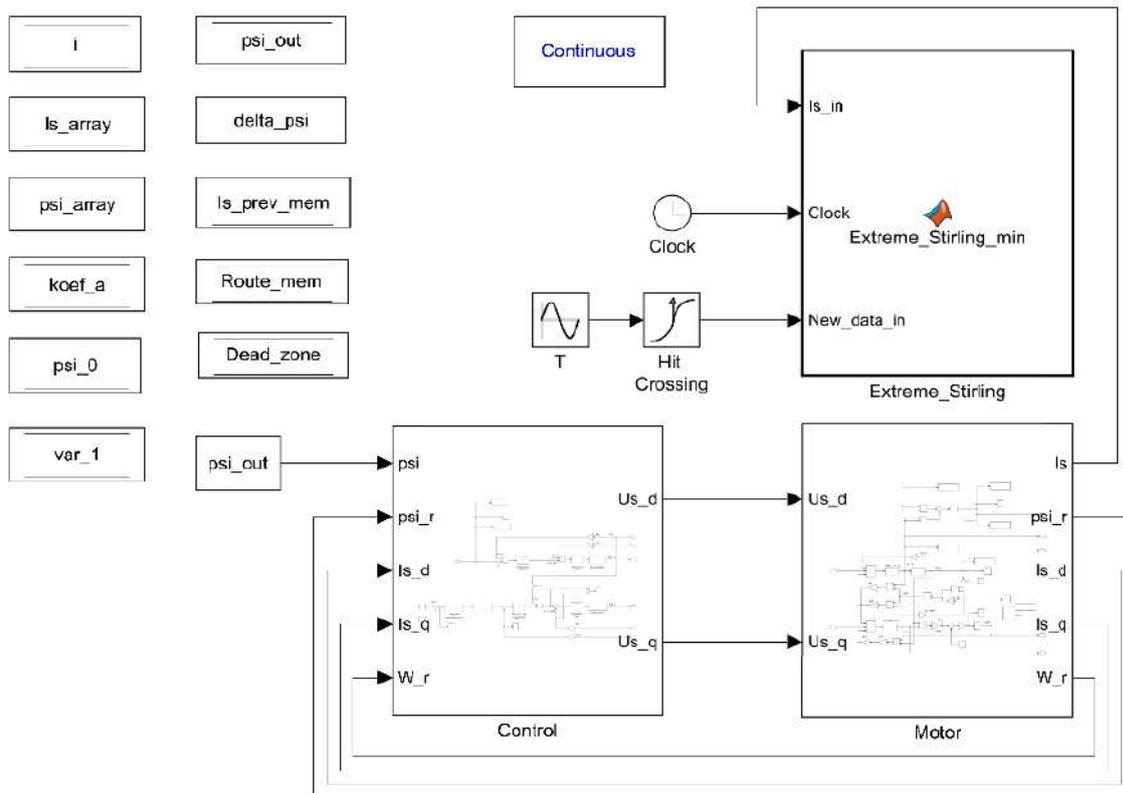
$$a = \frac{I'_{S_1} \psi_{R_2} - \psi_{R_1} - I'_{S_2}}{2\psi_{R_2}}. \quad (7)$$

Таким образом, для определения старшего коэффициента  $a$  в полиноме (2) необходимы значения двух производных тока статора  $I'_{S_1}$  и  $I'_{S_2}$ , взятых с шагом  $\Delta\psi_R$ . Значения этих коэффициентов могут быть получены методом численного дифференцирования на основании нескольких значений функции  $I_S = f(\psi_R)$ . Для получения производной тока статора можно воспользоваться методом численного дифференцирования с помощью интерполяционной формулы Стирлинга [12].

Рассмотрим алгоритм работы СЭР с изменяемой в процессе поиска величиной шага  $\Delta\psi_R$  (рис. 5).

Согласно алгоритму поиск минимального значения тока статора начинается с блока 2, в

котором осуществляется задание начальных значений используемых переменных. В блоке 3 выполняется проверка состояния входов *off* и *New\_data*. Если на вход *off* подана лог. 1, то СЭР заканчивает свою работу. Если на вход *New\_data* поступает лог. 1, то осуществляется опрос текущего  $i$ -го значения тока статора  $I_S$  и его запись в массив  $I_S\_array(i)$  в блоках 8 и 9. На основании значений из массива  $\psi_R\_array(i)$  в блоке 10 определяется цикличность работы СЭР. Если СЭР работает в режиме поиска, то в блоках 11 и 12 определяется старший коэффициент  $a$  (выражение 7) и новый шаг  $\Delta\psi_R$  по формуле (3). Если СЭР не работает в цикле первого рода, то в блоке 14 рассчитанная величина шага  $\Delta\psi_R$  уменьшается на 0,1. В блоке 15 производится сравнение разницы предыдущего  $I_S$  *previous* и текущего  $I_S$  значений тока статора с величиной зоны нечувствительности  $\delta$  СР. Если это неравенство не соблюдается, то теку-



**Рис. 6.** Структурная схема двигателя с экстремальным управлением в пакете Matlab / Simulink: Motor – модель двигателя; Control – модель системы управления; Extreme\_Stirling – программный блок экстремального регулятора; Hit Crossing – блок выявления нулевых значений; T – функциональный генератор; Clock – часы текущего времени

**Fig. 6.** Structural scheme of the engine with the extreme control in the Matlab/Simulink package: Motor – engine model; Control – control system model; Extreme Stirling – program block of the extreme regulator; Hit Crossing – zero values detection block; T – functional generator; Clock – current time clock

щее направление поиска меняется на противоположное. В случае если это неравенство верно, то направление поиска остается неизменным. В соответствии с текущим направлением поиска блоками 18 или 19 рассчитывается новая величина потокосцепления ротора, поступающая на вход векторной системы управления асинхронным двигателем.

### Имитационное моделирование

В соответствии с алгоритмом экстремального регулирования разработана имитационная модель системы экстремального управления асинхронным приводом в среде Matlab / Simulink [13–15] (рис. 6).

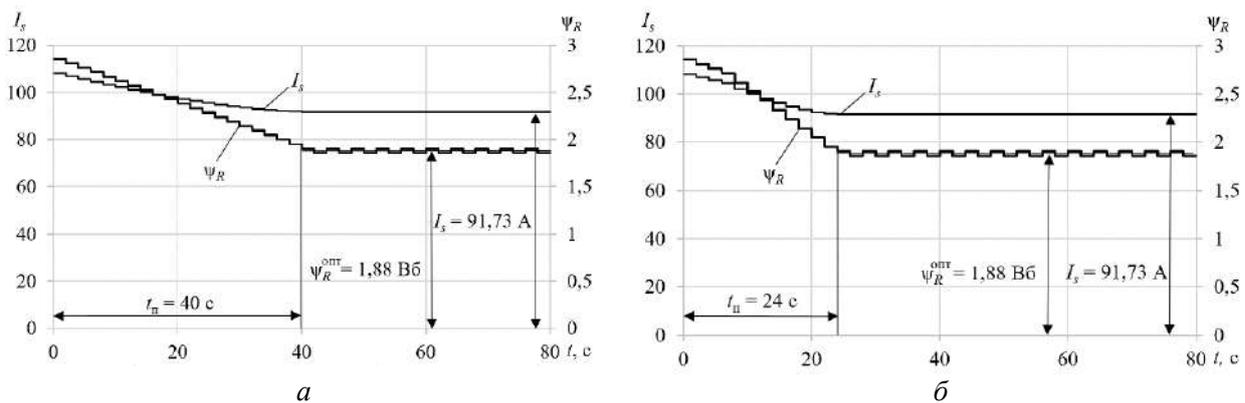
Схема состоит из программного блока *Extreme\_Stirling*, одиннадцати блоков памяти, имитационной модели двигателя *Motor*, системы его управления *Control* с каналами управления по скорости  $W_r$  и потокосцеплению  $\psi_r$ . Шаг работы экстремального регулятора задается функциональным генератором  $T$  и блоком *Hit Crossing*.

На входы блока *Extreme\_Stirling* поступают значения трех управляющих сигналов: контролируемого значения тока статора  $I_s$ , полученного на выходе блока модели двигателя *Motor*, текущего значения времени моделирования *Clock* и сигнала *New\_data\_in*, контролирующего поступление обновленного значения тока статора. Блоки памяти предназначены для хранения: номера текущего шага поиска  $i$ , нескольких предыдущих значений тока статора

$I_s\_array$  и потокосцепления  $\psi\_array$ ,  $\psi\_0$  ротора, коэффициента  $a$  полинома второй степени  $koef\_a$ , вспомогательных переменных в массиве  $var\_1$ , предыдущего значения тока двигателя  $I_s\_prev\_mem$ , ширины зоны нечувствительности  $Dead\_zone$ , направления поиска экстремального значения  $Route\_mem$ , текущего значения потокосцепления  $\psi\_out$ , величины его приращения  $\Delta\psi$ . Работа блока *Extreme\_Stirling* осуществляется в соответствии с приведенным выше алгоритмом работы экстремального регулятора. Он программно реализован на языке Си при помощи встроенного в *MATLAB* редактора.

Результаты имитационного моделирования работы системы экстремального регулирования показаны на рис. 7.

Из анализа рисунков следует, что система экстремального регулирования выполняет поиск минимального значения тока  $I_s$  путем пошагового изменения величины потокосцепления  $\psi_r$ . При этом на рис. 7, а видно, что приращение  $\Delta\psi_r$  выбрано неизменным во всем интервале поиска. На рис. 7, б поиск минимального значения тока  $I_s$  осуществляется с изменяющимся шагом. Так увеличение  $\Delta\psi_r$  в середине процесса поиска позволяет значительно уменьшить время поиска с 40 до 24 с. В обоих случаях достигается примерно одно и то же значение минимального тока  $I_s = 91,73$  А при принятой в моделировании величине электромагнитного момента 350 Н·м.



**Рис. 7.** Результаты моделирования системы экстремального регулирования ( $I_s$  – ток статора двигателя;  $\psi_r$  – потокосцепление ротора;  $t_n$  – время поиска):

$a$  – с постоянным шагом  $\Delta\psi_r$ ;  $b$  – с изменяющимся шагом  $\Delta\psi_r$

**Fig. 7.** Extreme regulating system modeling results ( $I_s$  – engine stator current;

$\psi_r$  – rotor flux linkage;  $t_n$  – search time):

$a$  – with a constant step  $\Delta\psi_r$ ;  $b$  – with an alternating step  $\Delta\psi_r$

**Заключение**

Разработанная система экстремального регулирования позволяет повысить энергетическую эффективность вспомогательных машин электровоза и сократить время поиска оптимального значения  $\psi_R$  за счет использования экстремального регулятора с изменяемым шагом. Предлагаемая структура управления

уменьшает электрические потери в двигателе во всех режимах его работы. Для рассмотренного в работе двигателя 4A225M4 У2 величину тока статора  $I_S$  удалось сократить на 15 %, а время поиска оптимального значения на 40 % по сравнению с классическим методом экстремального регулирования с постоянным шагом поиска.

**Список литературы**

1. Yousef A. Abdel maksoud S. Review on Field Oriented Control of Induction Motor. *International Journal For Research In Emerging Science And Tech-nology*. 2015. Vol. 2. No. 7. 12 p.
2. Mkrini Z., Bri S. A Modular Approach and Simulation of an Asynchronous Machine. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2016. Vol. 4. No 6. 10 p.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. М.: Энергия, 1974. 839 с.
4. Калачёв Ю.Н. SimInTech: моделирование в электроприводе. М. ДМК Пресс. 2019. 98 с.
5. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A. Application of an Extreme Control Sys-tem to Operate the Reactive Power Compensator of an Electric Locomotive. *Russian Electrical Engineering*. 2016. Vol. 2. No. 87. 3 p.
6. Растринин Л.А. Системы экстремального управления. М.: Наука, 1974. 623 с.
7. Кулинич Ю.М., Шухарев С.А., Гуляев А.В. Устройство экстремального управления асинхронного двигателя. Заявка на изобретение № 2021121608 Российская Федерация, МПК В 60 L 3/10.: заявл. 20.07.2021.
8. Кравчик А.Э., Шлаф М.М. Асинхронные двигатели серии 4А. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
9. Кулинич Ю.М., Шухарев С.А. Повышение энергетических показателей электровоза переменного тока за счет новой структуры управления компенсатором. *Электротехника*. 2016. № 9. С. 57–61.
10. Kulinich Y.M., Shukharev S.A. Improving the energy performance of an ac electric locomotive using a new compensator control structure. *Russian Electrical Engineering*. 2016. Vol. 87. No. 9. P. 532–535. DOI 10.3103/S106837121609008X.
11. Шухарев С.А. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока на основе применения экстремального компенсатора реактивной мощности: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2017. 24 с.
12. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. Т. 1. М.: ГИФМЛ, 1962. 464 с.
13. Дьяконов В.П. Simulink: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2015. 782 с.
14. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. СПб.: Лань, 2013. 448 с.
15. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (MatLab 7.0.1). Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 320 с.
16. Eshkabilov S. Beginning MATLAB and Simulink: From Novice to Professional. Apress, 2019. 544 p.
17. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронным двигателем. СПб.: изд-во СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
18. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами. Новосибирск: изд-во НГТУ, 1999. 66 с.

**References**

1. Yousef A. Abdel Maksoud S. Review on Field Oriented Control of Induction Motor. *International Journal for Research in Emerging Science and Technology*, 2015. Vol. 2. No 7. 12 p.
2. Mkrini Z., Bri S. A Modular Approach and Simulation of an Asynchro-nous Machine. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2016. Vol. 4. No. 6. 10 p.
3. Voldek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric cars]. Moscow: Energiya Publ., 1974. 839 p.
4. Kalachev Yu.N. SimInTech: modelirovanie v elektroprivode [SimInTech: Simulation in an electric drive]. Moscow: DМК Press Publ., 2019. 98 p.
5. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A. Application of an Extreme Control System to operate the Reactive Power Compensator of an Electric Locomotive. *Russian Electrical Engineering*. 2016. Vol. 2. No. 87. 3 p.
6. Rastrigin L.A. Extreme control systems. М.: Nauka, 1974. 623 p.
7. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A., Gulyaev A.V. Application for invention No. 2021121608 Russian Federation, IPC B 60 L 3/10. Apr. 20.07.2021.
8. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I. etc. Asinkhronnye dvigateli serii 4A [Asynchronous motors of the 4A series]. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 504 p.
9. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A. Povyshenie ehnergeticheskikh pokazateley ehlektrovoza peremennogo toka za schet novoy struktury upravleniya kompensatorom [Increasing the energy performance of an alternating current electric locomotive due to a new control structure of the compensator]. *Elektrotekhnika [Electrical engineering]*. 2016, No. 9. pp. 57–61.
10. Kulinich Y.M., Shukharev S.A. Improving the energy performance of an ac electric locomotive using a new compensator control structure. *Russian Electrical Engineering*. 2016. Vol. 87. No. 9. pp. 532–535. DOI 10.3103/S106837121609008X.
11. Shukharev S.A. Povyshenie ehnergeticheskoy ehffektivnosti ehlektrovozov peremennogo toka na osnove primeneniya ehkstreml'nogo kompensatora reaktivnoy moshhnosti: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. [Increasing the energy efficiency of

alternating current electric locomotives based on the use of an extreme reactive power compensator: author. Ph.D. (Engineering) diss.]. Komsomol'sk-na-Amure GTU, 2017. 24 p.

12. Berezin I.S., Zhidkov N.P. Metody vychisleniy. Tom 1 [Calculation methods. Vol. 1]. Moscow: GIFML Publ., 1962. 464 p.

13. Dyakonov V.P. Simulink: samouchitel' [Simulink: Tutorial]. Moscow: DMK Press Publ., 2015. 782 p.

14. German-Galkin S.G. Virtual'nye laboratorii poluprovodnikovyykh sistem v srede Matlab-Simulink [Virtual laboratories of semiconductor systems in the Matlab-Simulink environment]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2013. 448 p.

15. Terekhin V.B. Modelirovanie sistem ehlektroprivoda v Simulink (MatLab 7.0.1) [Simulation of electric drive systems in Simulink (MatLab 7.0.1)]. Tomsk: Tomskij politekhnicheskij universitet Publ., 2008. 320 p.

16. Eshkabilov S. Beginning MATLAB and Simulink: From Novice to Professional. Apress. 2019. 544 p.

17. Usoltsev A.A. Chastotnoe upravlenie asinkhronnym dvigatelem [Frequency control of an asynchronous motor]: Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki Publ., 2006. 94 p.

18. Pankratov V.V. Vektornoe upravlenie asinkhronnymi ehlektroprivodami [Vector control of asynchronous electric drives]. Novosibirsk: Novosibirskij gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet Publ., 1999. 66 p.

### Информация об авторах

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

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

### Information about the authors

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

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

## Исследование условий движения порожнего состава по участкам различного профиля

В. А. Нехаев<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

Работа выполнена на основе анализа технических заключений случаев сходов порожнего подвижного состава на Красноярской и Восточно-Сибирской железных дорогах в период с 1996 по 2021 г. Установлено, что сходы чаще всего происходят внутри кривой (67 % случаев). Анализ позволил выявить параметры пути и подвижного состава, оказывающие существенное влияние на сход вагонов в прямых и криволинейных участках пути. В статье исследованы условия сходов вагонов при движении по различным участкам пути, рассмотрены основные причины сходов согласно техническим заключениям. В процессе движения порожнего подвижного состава возникают силы взаимодействия. Разработанная расчетная схема достаточно полно характеризует процессы действия сил на вагон. В работе приведены зависимости направляющих сил, действующих в точке контакта колеса и рельса, для набегających и ненабегających колес с учетом положения вагона в кривой. Произведен расчет и анализ углов набегания гребня колеса на рабочую поверхность рельса, который позволил установить, что угол набегания не превышает допустимые значения и не оказывает существенного влияния на сход. Исследования также показали, что поперечные горизонтальные направляющие усилия достаточно малы и причиной схода сами по себе быть не могут.

### Ключевые слова

всползание колеса вагона, безопасность движения, направляющие усилия, сход вагона, угол набегания

### Для цитирования

Нехаев В. А. Исследование условий движения порожнего состава по участкам различного профиля / В. А. Нехаев, Е. Г. Леоненко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 78–86. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).78-86

### Информация о статье

поступила в редакцию: 17.09.2021, поступила после рецензирования: 22.09.2021, принята к публикации: 15.10.2021

## Investigation of the conditions of movement of an empty train on plots of various profiles

V. A. Nekhaev<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 work was carried out based on the analysis of technical conclusions of cases of empty rolling stock derailments on the Krasnoyarsk and East Siberian railways in the period of 1996 to 2021. Analyzing the cases of derailments of empty rolling stock, it was found that derailments mostly occur inside the curve (67 % of cases). The analysis of the derailments made it possible to establish the parameters of the track and rolling stock that have a significant effect on the derailment of cars in straight and curved sections of the track. The analysis of the conditions of car derailments when moving along various sections of the track is carried out, the main reasons for the derailments are considered, according to the technical conclusions. In the process of an empty rolling stock motion, interaction forces arise; the developed calculation scheme quite fully characterizes the processes of forces affecting a car. The dependences of the directing forces acting at the point of contact between the wheel and the rail for running and non-running wheels are given, taking into account the position of the car in the curve. The calculation and analysis of the wheel flange run-in angles on the rail working surface was carried out, which made it possible to establish that the run-in angle does not exceed the permissible values and does not have a significant effect on the run-off. The paper analyzes the forces acting at the point of contact between the wheel and the rail head, studies have shown that the transverse horizontal guiding forces are small enough and cannot be the cause of the descent by themselves.

**Keywords**

run-in of the car wheel, traffic safety, directing forces, car derailment, run-in angle

**For citation**

Nekhaev V. A., Leonenko E. G. Issledovanie usloviy dvizheniya porozhnogo sostava po uchastkam razlichnogo profilya [Investigation of the conditions of movement of empty trains on sections of various profiles]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 78–86. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).78-86

**Article info**

Received: 17.09.2021, Revised: 22.09.2021, Accepted: 15.10.2021

**Введение**

Безопасность движения поездов является приоритетным направлением в развитии железнодорожного комплекса. Одна из важнейших задач ОАО «РЖД» – недопущение транспортных происшествий, повлекших крушения и сходы поездов.

Сход подвижного состава может возникнуть в результате:

- несогласованности действий работников (прием поезда на занятый путь, взрез стрелочного перевода и т. д.);

- нарушения соблюдения технических параметров подвижного состава и верхнего строения;

- действия сил на подвижную единицу, превосходящих допустимые значения при всползании гребня колеса на рабочую поверхность рельса (рис. 1).

С 1996 по 2021 г. на Красноярской и Восточно-Сибирской железных дорогах было допущено более 100 случаев сходов порожнего подвижного состава, большая часть которых

приходится на сходы внутрь кривой без существенных отклонений в содержании пути и подвижного состава. На основании технических заключений расследований сходов подвижного состава произведен анализ виновных в транспортном происшествии (рис. 2). Из гистограммы видно, что чаще всего сходы происходят из-за ненадлежащего содержания железнодорожного пути (просадки, перекосы, уширения), и только в семи случаях из всех рассмотренных виновником аварии признана локомотивная бригада [1].

**Теоретические исследования**

При следовании вагонов по участкам пути различного плана и профиля между подвижным составом и рельсами появляются силы взаимодействия, величина и направление которых обусловлены как характеристиками рельсового полотна, так и самих подвижных единиц.

Основными характеристиками пути, определяющими силы взаимодействия с подвижным составом, являются: радиус кривой,



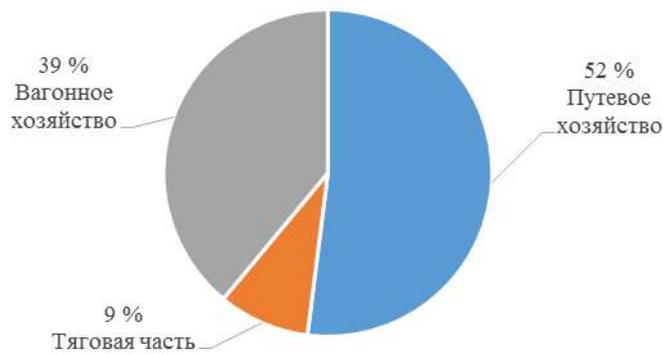
**Рис. 1.** Сход вагонов внутрь кривой  
**Fig. 1.** The inward descent of cars off the curve

ширина колеи, возвышение наружного рельса, износ рельсов, жесткость верхнего строения пути, величина уклона отвода в переходных кривых, наличие отклонений от общепризнанных мерок содержания. Особое влияние на сходы вагонов внутрь рельсовой колеи оказывают переходные кривые, предназначенные для спрямления пути кривого участка, имеющего возвышение рельса, и прямого. При этом происходит сход в безмятежном режиме без резких толчков и в ряде случаев без обрыва тормозной магистрали. Сход (61 % случаев) вызван вкатыванием на поверхность катания рельса гребня наружного либо внутреннего

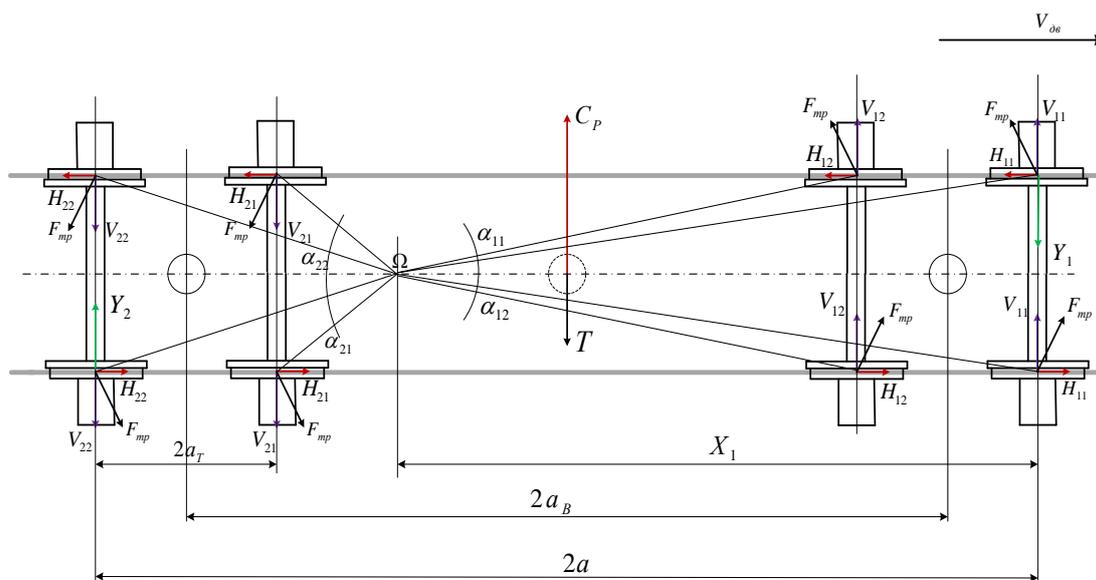
колеса первой по ходу колесной пары [2].

Для подвижного состава такими характеристиками являются: масса экипажа, масса необрессоренных частей, жесткость рессорного подвешивания, колесная база, диаметр колес, толщина гребней колес, высота центра тяжести, наличие отклонений от норм содержания (разность диаметров колес, толщины гребней, зазоров в скользунах).

Силы, возникающие между подвижной единицей и рельсошпальной решеткой, в некотором приближении можно разделить на действующие в продольном и поперечном направлении относительно оси пути [3, 4].



**Рис. 2.** Диаграмма распределения сходов по службам  
**Fig. 2.** Diagram of the distribution of derailments for services  
 39% Car service; 52% Track service; 9% Traction service



**Рис. 3.** Схема действия сил на вагон при вписывании в кривую (положение наибольшего перекоса)  
**Fig. 3.** Diagram of the forces affecting the car when fitting into the curve  
 (the position of the greatest skew)

В продольной плоскости действуют: силы трения между профилем катания колеса и рабочей гранью рельса, горизонтальная составляющая гравитационной силы, центробежное ускорение и направляющее усилие со стороны рельсов.

При наличии износа рельса гребень в точке контакта испытывает обычное давление, действующее поперек к рельсовому полотну (рис. 3).

Горизонтальная составляющая силы, называемая направляющим усилием  $Y_1$ , старается оттеснить колесную пару, изменяя параметры качения колес. При этом грузовой вагон в процессе движения находится в положении, при котором направляющее усилие  $Y_{гор}$  действует только на внешний гребень первой по ходу колесной пары в поперечном к оси пути направлении [5].

При повышении скорости движения положение тележки в кривой меняется под действием центробежного ускорения, тележка смещается внутрь кривой и направляющее усилие  $Y_2 = 0$ . Такое положение вагона называется свободной установкой, эта ситуация возникает при скорости движения  $V_{вп} = V_{св.у.}/V_{хор}$ . На вагон в точке контакта колес и рельсов действует только одно направляющее усилие  $Y_1$  на гребень первой по ходу колесной пары, а мгновенный полис поворота оси вагона смещается вправо по ходу вдоль оси тележки.

При дальнейшем возрастании скорости движения вагон переходит в положение хордовой установки, в момент перехода мгновенный полюс перемещается в центр продольной оси тележки и набегает крайними колесными парами на наружный рельс, в этом положении максимальная скорость ограничения конструкционной скорости подвижной единицы  $V_{вп} = V_{хор.}/V_{констр.}$

В первых двух случаях положение полюса поворота продольной оси тележки является вполне определенным. Упругое отжатие рельсов, которое возникает при движении вагона в кривой, имеет место незначительного изменения положения полюса и в первом приближении этим можно пренебречь.

В пологих кривых либо прямых участках пути колесная пара осуществляет волнообразное движение. Вагоны, находящиеся в составе поезда при движении в криволинейных участках пути, занимают разные положения. При

этом имеется горизонтальное перемещение рельса в пределах от 1,9 до 2,6 мм в зависимости от радиуса кривой.

В криволинейном участке за счет постепенного уширения рельсовой колеи в переходной кривой в первой колесной паре тележки в поперечном направлении перемещается площадка контакта колеса, движущегося по внутреннему рельсу; во второй колесной паре в поперечном направлении перемещается площадка контакта обоих колес как за счет постепенного уширения колеи в переходной кривой, так и за счет постепенного заноса второй колесной пары тележки наружу кривой.

В кривых участках пути при  $R = 350–600$  м тележка вагона движется по примыкавшей набегавшим колесом к рабочей грани наружного рельса. К вращению добавляется скольжение в поперечном направлении к продольной оси пути, что принуждает набегавшее колесо смещаться от направляющего качения путем неизменного бокового касания гребня колеса головки рельса [6–8].

Поскольку профиль гребня колеса пологий, по кругу катания имеется конусность равная 1:10, то при вписывании в кривую малого радиуса внешнее колесо начинает набегать на головку рельса [9]. Практически у каждой набегавшей колесной пары имеется небольшой угол  $\alpha$  (угол набегания), который возникает в точке контакта гребня колеса в направлении качения с продольным направлением рельсов, вследствие чего ось вращения колесной пары отклоняется от главного радиуса [10].

При идеальном движении вагона по разным участкам пути колесная пара должна занимать радиальное положение в кривой, но при существующих нормативах железнодорожного полотна и гребней колес данное положение невозможно. Нерадиальное положение колесной пары приводит к появлению поперечного скольжения колеса, что понижает величину коэффициента сцепления [11]. При прохождении возможных перемещений колесной пары набегавшее колесо допускает перемещение вдоль образующей конуса поверхности гребня, а ненабегавшим колесом – вдоль касательной к профилю поверхности катания. При следовании подвижного состава по эталонному железнодорожному пути гребень колеса своей выкружкой не должен взаимодействовать с рабочей гранью рельса. Ввиду того, что на железно-

дорожном пути имеются неровности между направлением движения колесной пары и продольной осью пути в момент начала набегания колеса на рельс образуется угол набегания. Так как колесо совершает скольжение, то угол набегания не остается постоянным, а все время меняется. Углы набегания в процессе следования в кривой постоянного радиуса не меняются. Характер движения изменяется при следовании в переходной кривой.

Угол считается положительным при вращении касательной до совмещения с плоскостью качения данного колеса в направлении против часовой стрелки.

При установке вагона в положение наибольшего перекоса углы  $\alpha_{ij}$   $i$ -го колеса  $j$ -ой колесной пары ( $i = 1, 2; j = 1, 2$ ) могут быть как положительными, так и отрицательными [12]. Их величина зависит от зазора между гребнем колеса и головкой рельса  $2\delta$ , базы вагона  $2a$ , радиуса кривой  $R$  и от возвышения наружного рельса в кривой  $h$ . Найдем соотношения приведенных величин, при выполнении которых углы принимают положительные и отрицательные значения. При выполнении равенства  $\frac{\delta}{a} = \frac{2a}{R+h}$  вторая тележка по ходу движения находится в радиальном положении. Из приведенной схемы следует, что если име-

ет место условие  $\frac{\delta}{a} \leq \frac{2a}{R+h}$ , то значения обозначенных углов имеют положительную величину. Если выполняется условие  $\frac{\delta}{a} \geq \frac{2a}{R+h}$ , то углы отрицательные (рис. 3).

В табл. 1 приведены зависимости сил, действующих в точке контакта колеса и рельса для набегающих и ненабегающих колес, с учетом положения вагона в кривой [13].

Гребень под действующей на него массой вагона скользит в точке контакта на головке рельса вертикально вниз. Поперечное скольжение тем сильнее, чем больше отклоняется колесная пара от направления собственного качения, и чем больше она во время касания при набегании отклоняется от своей радиальной установки. Это же относится к скольжению гребня. Обозначенное дополнительное поперечное скольжение поверхностей катания колеса и скольжение по наклонной вниз гребня вызывает противоположно направленное сопротивление скольжению. Необходимое направление движения набегающей колесной пары в кривой или на прямом участке колеи требует, чтобы колесная пара совершала движение, не изменяя своего угла по отношению к оси пути. По этой же причине колесная пара должна не только перемещаться поперек пути, но и пово-

**Табл. 1.** Направляющие усилия и силы трения, действующие в продольном и поперечном направлении

**Table. 1.** Guiding forces and friction forces acting in the longitudinal and transverse directions

Расчетная величина	Набегающие колеса	Ненабегающие колеса
Возвращающая сила	$F_{yi}^p = N_i \sin \beta_i$	$F_{yi}^p = N_i \sin \gamma_i$
Поперечная сила трения	$F_{yi}^{ck} = N_i f \cos \beta_i \sin \vartheta_i$	$\mp F_{yi}^{ck} = N_i f \cos \beta_i \sin \vartheta_i$
Реакция рельса	Наружное колесо $N_i = \frac{P_i}{\cos \beta_i \pm f \cos \gamma' \sin \vartheta_i}$	Наружное колесо $N_i = \frac{P_i}{\cos \alpha \pm f \sin \gamma \sin \vartheta_i}$
	Внутреннее колесо $N_i = \frac{P_i}{\cos \beta_i \mp f \cos \gamma' \sin \vartheta_i}$	Внутреннее колесо $N_i = \frac{P_i}{\cos \alpha \mp f \cos \gamma' \sin \vartheta_i}$
Продольная сила трения	$\sum_{i=1}^n F_{xi}^{ck} = \sum_{i=1}^n N_i (f \cos \vartheta_i - \frac{(f \cos \vartheta_i) r_i^e}{\cos \gamma_i r_i^n})$	

рачиваться соответственно кривизне пути вокруг вертикальной оси, но имеющаяся разница радиусов кругов катания почти никогда не бывает достаточной для необходимого поворота колесной пары [14, 15]. Это не может вызвать значительное направляющее усилие гребня.

Для того чтобы осуществлялся нормальный поворот одиночной колесной пары в кривой, необходимо, чтобы отношение диаметров кругов катания внутреннего и наружного колес равнялось отношению радиусов внутренних и наружных ниток кривой. Если отношение будет меньше отношения радиусов колеса, то колеса будут работать в режиме проскальзывания и сухого трения.

Угол между направлением подхода колесной пары к точке набегания и продольным направлением рельсов в поперечном сечении гребня в момент начала набегания называют углом удара. Он отличается от угла набегания в случае перемещения колеса не только качением, но и дополнительным скольжением к моменту набегания. Угол набегания гребня колеса на головку рельса зависит от зазора в рельсовой колее и непараллельности осей колесных пар, вызванной наличием зазора между буксой и боковой челюстью боковины и определяется как их сумма [16]. Сход порожнего вагона с рельсов произойдет, когда углы набегания превысят допустимые значения (см. табл. 2). Допустимые углы набегания рассчитываются согласно нормативам содержания

пути и подвижного состава без учета допустимых отклонений в содержании вагона (перекос кузова вагона из-за разницы зазоров в скользунах, разницы высоты рессорного подвешивания и т. д.).

Анализируя данные, полученные из расчетов углов набегания, можно сделать вывод, что углы набегания при технически исправном состоянии железнодорожного пути не несут опасности для движения поездов. При учете отклонений в содержании текущего состояния вагонов углы набегания уваливаются более чем в 2 раза, но не могут оказать влияния на сход вагона.

При недостатке величины зазора между гребнем колеса и головкой рельса контакт осуществляется не по поверхности катания колеса, а на поверхности выкружки гребня. Колесо выбирает точку контакта не за счет конусности профиля катания колеса, а за счет дополнительного перегиба и поворота колесной пары в процессе набегания, что способствует вползанию гребня колеса на рельс и последующему сходу порожнего вагона. Также недостаточная величина зазора может спровоцировать отжатие одной из рельсовых нитей.

Выполнен анализ влияния зазора на установку грузового вагона в кривой. Установлено, что во всех случаях схода внутрь кривой зазор между рабочей поверхностью рельса и гребнем колеса меньше, чем необходимый для свободной установки вагона, когда нормативные па-

**Табл. 2.** Углы набегания гребня колеса на головку рельса в рассмотренных участках схода порожних вагонов

**Table. 2.** Angles of incidence of the wheel on the rail on the considered sections of the empty cars derailment

Показатель	Значение				
Радиус кривой $R$ , м	583	641	1 033	1 180	1 309
Допустимый угол набегания, рад	0,074	0,067	0,0815	0,0714	0,052
Фактический угол набегания колеса на рельс, рад	0,0221	0,017	0,022	0,0225	0,019

**Табл. 3.** Результаты расчета реальных условий движения вагона в кривых различных радиусов

**Table. 3.** The results of calculating the real conditions of motion of the car in curves of different radii

Скорость схода $V_{сх}$ , км/ч	Радиус кривой $R$ , м	Скорость переезда в положении свободной установки, км/ч	Возвышение наружного рельса $h_p$ , м	Зазор между гребнем колеса и внутренней поверхностью рельса, м	Поперечные направляющие усилия, кН			Коэффициент запаса устойчивости
					$Y_1$	$Y_2$	$Y_{бок}$	
76	583	130,82	0,06	0,029	32,56	25,56	13,68	1,35
73	641	136,01	0,06	0,026	30,93	24,74	14,42	1,335
70	1033	130,54	0,04	0,028	32,43	23,92	15,11	1,313
78	1180	124,2	0,06	0,027	32,32	21,87	14,87	1,368
71	1309	109,8	0,05	0,026	32,33	21,98	15,2	1,347

раметры содержания пути это позволяют [17]. При увеличении зазора в кривых радиусом 300–600 м на 2 мм устойчивость вагона увеличивается на 10–20 %, а в кривых радиусом более 600 м на 15–25 %.

В то же время направляющее усилие от внешнего рельса  $Y_1$  в диапазоне допустимых скоростей не превышает 30–34 кН, его горизонтальная составляющая – 18 кН, а вертикальная нагрузка на колесо составляет 32 кН.

В большинстве рассмотренных случаев в режимах выбега и тяги при скорости 60–80 км/ч сходы происходят не наружу, а внутрь кривой. При этом, как правило, вагон находился в положении наибольшего перекоса, а одним из факторов, вызвавшим нарушение безопасности движения, явился момент  $Y_2 \cdot 2a$  от направляющего усилия, оказывающего влияние на гребень четвертой колесной пары по ходу движения.

При возрастании скорости движения на кривых участках пути величина направляющего усилия  $Y_2$  значительно уменьшается. Особенно это заметно в кривых радиусом 350–600 м. Анализ результатов расчетов для приведенных произвольно выбранных случаев схода вагонов внутрь кривой приведен в табл. 3.

Результаты расчетов позволили установить, что величины поперечных горизонтальных усилий  $Y_{бок}$ , действующих в точке контакта колес и рельсов, недостаточно для того, чтобы спровоцировать отжатие рельса даже при положении наибольшего перекоса и вызвать сход вагона [18]. Анализ материалов технических заключений, случаев сходов и расчет параметров пути, позволили установить, что в ряде случаев (62 %) сход вагона произошел на участке пути, где возвышение наружного рельса значительно больше необходимого или же, наоборот, меньше расчетной величины, что приводит к перераспределению нагрузок в точке контакта колеса и рельса. Например, в кривой радиусом 583 м возвышение наружного

рельса составило всего 0,06 м, при необходимом по условиям безопасности движения поездов 0,131 м. При нормализации возвышения наружного рельса в кривых, уменьшится длина переходных кривых, что обеспечит плавность отвода возвышения.

В 25 % случаев сходов непогашенное ускорение приобретает знак «–», т. е. горизонтальная составляющая гравитационной силы веса значительно больше результата действия центробежного ускорения, и вагон под его действием отклоняется не наружу, как это должно быть, а внутрь кривой.

### Заключение

В результате исследования взаимодействия подвижного состава и пути получены следующие результаты:

1. Углы набегания гребня колеса на головку рельса достаточно малы и сами по себе вызвать всползание гребня колеса на поверхность головки рельса не могут.

2. Результаты расчетов показали, что при вписывании грузовых вагонов в кривые участки пути различного радиуса величина зазора между рабочей гранью рельса и гребнем колеса недостаточна для того, чтобы вагон в процессе движения мог занять положение свободной установки. В 90 % случаев сходов вагон в момент всползания колеса на головку рельса находился в положении наибольшего перекоса.

3. Численная величина диаметральных горизонтальных боковых сил примерно в три раза меньше направляющего усилия  $Y_1$  во всех рассмотренных случаях, вследствие чего схода вагона при движении вызвать не может, даже при неблагоприятных условиях.

На основании выполненного анализа будут произведены исследования динамических сил и определение уровня их влияния на безопасность движения порожнего подвижного состава.

### Список литературы

1. Леоненко Е.Г. Анализ действия сил на порожний подвижной состав при вписывании в кривые участки пути // Цифровизация транспорта и образования : материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 125-летию железнодорожного образования в Сибири. Красноярск, 2019. С. 384–388.
2. Николаев В.А., Капустина Е.П., Леоненко Е.Г. Причины схода порожнего подвижного состава на Красноярской и Восточно-Сибирской железных дорогах // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2019. №1 (41). С. 47–53.
3. Вериги М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М. : Транспорт, 1986. 558 с.
4. Данилов В.Н. Железнодорожный путь и его взаимодействие с подвижным составом. М. : Трансжелдориздат, 1961. 111 с.
5. Вериги М.Ф. Динамика вагонов. М. : ВЗИИТ, 1971. 176 с.

6. Капустина Е.П., Леоненко Е.Г. Влияние технических характеристик и их отклонений на устойчивость движения порожнего подвижного состава // Изв. Транссиба. 2019. № 2 (38). С. 16–23.
7. Голубенко А.Л. Сцепление колеса с рельсом. Киев : ВИПОЛ, 1993. 448 с.
8. Медель В.Б. Подвижной состав электрических железных дорог. М. : Транспорт, 1965. 280 с.
9. Вагоны: проектирование, устройство и методы испытаний / под ред. Л.Д. Кузьмича. М. : Машиностроение, 1978. 376 с.
10. Лазарян В.А., Длугач Л.А., Коротенко М.Л. Устойчивость движения рельсовых экипажей. Киев : Наукова думка, 1972. 198 с.
11. Погорелов Д.Ю., Симанов В.А. Показатель для оценки опасности схода подвижного состава путем вкатывания колеса на головку рельса // Вісник СНУ ім. В. Даля. 2010. № 5 (147). С. 64–70.
12. Михальченко Г.С., Погорелов Д.Ю., Симонов В.А. Совершенствование динамических качеств подвижного состава железных дорог средствами компьютерного моделирования // Тяжелое машиностроение. 2003. № 12. С. 2–6.
13. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. М. : Наука, 1974. 432 с.
14. Хейман Х. Направление железнодорожных экипажей рельсовой колеи. М. : Трансжелдориздат, 1957. 416 с.
15. Влияние параметров подвижного состава и пути на устойчивость движения / Н.П. Буйнова, Е.П. Капустина, Е.Г. Леоненко и др. // Вестн. транспорта Поволжья. 2011. № 1 (25). С. 24–30.
16. Оценка безопасности движения вагонов при отклонениях от норм содержания ходовых частей и пути : дис. ... д-ра техн. наук / Г.И. Петров ; МИИТ. М., 2000. 348 с.
17. Коган А.Я., Черняков Е.А. Оценка достаточного условия устойчивости колеса на рельсе с учетом вероятностного характера, влияющего на нее некоторых факторов // Вестн. ВНИИЖТ. 2008. № 2. С. 36–41.
18. Капустина Е.П. Пути увеличения ресурса бандажей колес в зависимости от их технического состояния и условий эксплуатации электровозов : дис. ... канд. техн. наук / Е.П. Капустина. Иркутск, 2002. 147 с.

### References

1. Leonenko E.G. Analiz deystviya sil na porozhniy podvizhnoy sostav pri vpiyvaniy v krivyye uchastki puti [Analysis of the effect of forces on empty rolling stock when entering into curved sections of the track]. *Tsifrovizatsiya transporta i obrabotvaniya: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashhennoy 125-letiyu zheleznodorozhnogo obrabotvaniya v Sibiri [Digitalization of transport and education: Materials of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of railway education in Siberia]*. Krasnoyarsk, 2019. pp. 384–388.
2. Nikolaev V.A., Kapustina E.P., Leonenko E.G. Prichiny skhoda porozhnego podvizhnogo sostava na Krasnoyarskoy i Vostochno-Sibirskoy zheleznykh dorogakh [The reasons for the derailment of empty rolling stock on the Krasnoyarsk and East Siberian railways]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobsheniya [Bulletin of the Ural State Transport University]*. 2019, No. 1(41), pp. 47–53.
3. Verigo M.F., Kogan A.Ya. Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava [Track and rolling stock interaction]. Moscow: Transport Publ., 1986. 558 p.
4. Danilov V.N. Zheleznodorozhnyi put' i ego vzaimodeistvie s podvizhnym sostavom [Railway track and its interaction with rolling stock]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1961. 111 p.
5. Verigo M.F. Dinamika vagonov [Dynamics of cars]. Moscow: VZIIТ Publ., 1971. 176 p.
6. Kapustina E.P., Leonenko E.G. Vliyaniye tekhnicheskikh kharakteristik i ikh otkloneniy na ustoychivost' dvizheniya porozhnego podvizhnogo sostava [The influence of technical characteristics and their deviations on the stability of the movement of empty rolling stock]. *Izvestiya Transsiba [Bulletin of Transsib]*. 2019, No. 2(38), pp. 16–23.
7. Golubenko A.L. Stsepleniye koleasa s rel'som [Wheel clutch with rail]. Kiev: VIPOL Publ., 1993. 448 p.
8. Medel V.B. Podvizhnoy sostav elektricheskikh zheleznykh dorog [Rolling stock of electrical railways]. Moscow: Transport Publ., 1965. 280 p.
9. Vagony: proyektirovaniye, ustroystvo i metody ispytaniy [Cars: design, device and test methods] / pod red. L.D. Kuz'micha. M.: Mashinostroyeniye, 1978. 376 s.
10. Lazaryan V.A., Dlugach L.A., Korotenko M.L. Ustoichivost' dvizheniya relsovykh ekipazhey [Movement stability of railway vehicles]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1972. 198 p.
11. Pogorelov D.Yu., Simonov V.A. Pokazatel dlya otsenki opasnosti skhoda podvizhnogo sostava putem vkatyvaniya koleasa na golovku relsa [The indicator for assessing the risk of rolling stock derailment by wheel mounting on the rail head]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia [Bulletin of East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl]*, 2010, No. 5(147), part I, pp. 64–70.
12. Mikhalchenko G.S., Pogorelov D.Yu., Simonov V.A. Sovershenstvovaniye dinamicheskikh kachestv podvizhnogo sostava zheleznykh dorog sredstvami komp'yuternogo modelirovaniya [Improvement of dynamic qualities of rolling stock of railways by means of computer modeling]. *Tyazheloe mashinostroeniye [Heavy mechanical engineering]*. 2003, No. 12, pp. 2–6.
13. Arnold V.I. Matematicheskiye metody klassicheskoy mekhaniki [Mathematical methods of classical mechanics]. Moscow: Nauka Publ., 1974. 432 p.
14. Heyman H. Napravleniye zheleznodorozhnykh ekipazhey relsovoy koleyey [The direction of railway carriages by rail gauge]. Moscow: Transzheldorizdat, 1957. 416 p.
15. Buianova N.P., Kapustina E.P., Leonenko E.G., Churinova O.V. Vliyaniye parametrov podvizhnogo sostava i puti na ustoychivost' dvizheniya [Impact of the parameters of the rolling stock and the track on the motion stability]. *Vestnik transporta Povolzhya [Bulletin of transport of the Volga region]*. 2011, No. 1(25), pp. 24–30.

16. Petrov G.I. Otsenka bezopasnosti dvizheniya vagonov pri odkloneniyakh ot norm sodержaniya khodovykh chastej i puti: dis. ... dok. tekhn. nauk [Evaluation of the safety of the movement of cars in the event of deviations from the norms of maintenance of running parts and track: D. Sc. (Engineering) diss.]. Moscow, МИИТ, 2000, 348 p.

17. Kogan A.Ya., Chernyakov Ye.A. Otsenka dostatochnogo usloviya ustoychivosti koleasa na relse s uchedom veroyatnostnogo kharaktera vliyayushchego na neye nekotorykh faktorov [Evaluation of sufficient condition of the wheel stability on the rail, taking into account the probabilistic nature of some factors influencing it]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin VNIIZhT]. 2008, No. 2, pp. 36–41.

18. Kapustina E.P. Puti uvelicheniya resursa bandazhey koles v zavisimosti ot ikh tekhnicheskogo sostoyaniya i usloviy ekspluatatsii elektrovozov: dis. ... kand. tekhn. nauk [Ways to increase the resource of wheel bands depending on their technical condition and operating conditions of electric locomotives: Ph.D. (Engineering) diss.]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2002, 147 p.

#### Информация об авторах

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

**Леоненко Елена Геннадьевна** – преподаватель электро-механического 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 in Engineering Science, The Full Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: nehaevva@rambler.ru.

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

## Исследование вариантов подключения микропроцессорных терминалов защит тяговых подстанций

П. С. Пинчуков✉

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

✉ pinchukov-pavel@mail.ru

### Резюме

В современной железнодорожной электроэнергетике используется широкий диапазон микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики в различных вариантах исполнения. На смену традиционным схемам подключения микропроцессорных устройств приходят новые схемы, надежность которых необходимо численно оценить путем поэтапного анализа и расчета вариантов возникновения функциональных отказов. Актуальность исследования обусловлена активной модернизацией железнодорожной энергетики за счет внедрения информационных технологий в системах управления технологическими процессами и перспективным расширением полигона использования цифровых технологий. В работе анализируются современные тенденции в области цифровизации тяговых подстанций железных дорог с применением микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики. Ввиду отсутствия в настоящее время в железнодорожной энергетике Российской Федерации базы данных показателей надежности цифровых систем релейной защиты и автоматики, в данной работе были взяты за основу схемы подключения и требования технологического проектирования для электроэнергетических цифровых подстанций, на основе чего был выполнен расчет показателей надежности для тяговых подстанций переменного тока железнодорожного транспорта. Результаты позволили провести сравнение новых и существующей (традиционной) схем по показателям надежности. Выявлено, что показатели надежности у новых схем не выше, чем у традиционной, что объясняется наличием в новых схемах нерезервируемых элементов, снижающих результирующие показатели надежности. Приводятся пошаговые примеры составления топологических схем замещения по надежности, выполнены моделирование и анализ деревьев отказов с учетом показателей надежности элементов на примере тяговой подстанции. Подчеркивается необходимость создания в ближайшем будущем базы данных нового цифрового и соединительного оборудования с указанием количественных значений показателей надежности устройств и комплексов релейной защиты и автоматики.

### Ключевые слова

тяговая подстанция, микропроцессорные устройства защиты и автоматики, цифровой трансформатор тока, наработка на отказ, вероятность безотказной работы

### Для цитирования

Пинчуков П. С. Исследование вариантов подключения микропроцессорных терминалов защит тяговых подстанций // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 87–95. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).87-95

### Информация о статье

поступила в редакцию: 20.09.2021, поступила после рецензирования: 27.09.2021, принята к публикации: 10.10.2021

## Microprocessor protection terminals of traction substations: Study of connection variants

P. S. Pinchukov✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ pinchukov-pavel@mail.ru

### Abstract

A wide range of microprocessor protection and automation devices in various designs is used in modern railway electric power industry. The traditional circuits for connecting microprocessor devices are being replaced by new circuits, the reliability of which must be numerically assessed by step-by-step analysis and assessment of options for the occurrence of functional failures. The relevance of the study is based on the total modernization of railway energetics through the implementation of information technologies in the technological process control systems and the advanced extension of the use of digital technologies. The paper studies numerical indicators of reliability of microprocessor relay protection devices at traction substations. It also analyzes current trends in the digitalization of railway traction substations using microprocessor protection and automation devices. Since the database of indicators of the reliability of digital protection and automation systems in the railway power industry of the Russian Federation is currently not available the connection diagrams and technological design requirements for electric power digital substations were taken as the basis. The reliability indicators were calculated for traction substations of alternating current of

railway transport. The results made it possible to compare new and existing (traditional) schemes in terms of reliability. It was revealed that the reliability indices of the new circuits are not higher than in the traditional one, which is explained by the presence of non-redundant elements in the new circuits, reducing the resulting reliability indices. Step-by-step examples of compiling topological equivalent circuits for reliability are given. Modeling and analysis of fault's trees are carried out, taking into account the reliability indicators of elements with an example of the traction substation. The need to create in the near future a database of new digital and connecting equipment with an indication of the quantitative values of the reliability indicators of devices and complexes of relay protection and automation is emphasized.

### Keywords

traction substation, microprocessor protection and automation devices, digital current transformer, mean time between failures, survival function

### For citation

Pinchukov P. S. Issledovanie variantov podklyucheniya mikroprocessornyh terminalov zashchit tyagovyh podstancij [Microprocessor protection terminals of traction substations: connection variants analyse]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 4 (72), pp. 87–95. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).87-95

### Article Info

Received: 20.09.2021, Revised: 27.09.2021, Accepted: 10.10.2021

### Введение

Надежное и устойчивое функционирование устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) является гарантом бесперебойного электроснабжения потребителей железных дорог, поэтому модернизации и обновлению технологий и элементов в системе РЗА уделяется повышенное внимание.

Правительством Российской Федерации утверждена долгосрочная программа по развитию ОАО «РЖД» до 2025 г., в соответствии с которой разработаны план и «дорожная карта» перехода на «цифровую железную дорогу», в результате чего ожидается повышение качества транспортных услуг за счет применения цифровых технологий [1, 2]. Основная роль в цифровой трансформации РФ на ближайшие два десятилетия определена интеллектуальному взаимодействию человека, программно-аппаратных модулей с развитой архитектурой и искусственного интеллекта в едином потоке цифровой информации на одном языке общения в общем информационном пространстве.

Реализуемые в системах электроснабжения железных дорог новые подходы и технологии в направлении цифровой трансформации предусматривают решение задач управления, связи, защиты и мониторинга между отдельными элементами системы и системой в целом. Новые цифровые технологии открывают для железнодорожной энергетики более широкие перспективы для реализации указанных вопросов и позволяют при решении привычных инженерных задач добиваться более эффективного и координированного управления сложными системами, их

режимами и параметрами, а также отдельными элементами этих систем [3–9]. Поэтому вполне ожидаемо, что цифровая трансформация одной из первых затронула систему РЗА железнодорожного транспорта, где от качественного функционирования всей системы и ее отдельных элементов напрямую зависит эффективность и бесперебойность перевозочного процесса [10–12].

### Актуальность проблемы и постановка цели и задач

Целью проводимого исследования является повышение эффективности функционирования микропроцессорных терминалов защит тяговых подстанций в системах электроснабжения железных дорог переменного тока. Для достижения поставленной цели проводится анализ вариантов схем подключения микропроцессорных защит, которые могут быть использованы на тяговых подстанциях переменного тока.

Актуальность исследования обусловлена реализацией проектов электрификации расширения Восточного полигона железных дорог и электрификации Байкало-Амурской магистрали (БАМ-2 и БАМ-3), который предусматривает оснащение строящихся тяговых подстанций современными микропроцессорными терминалами. Однако вопрос выбора схем подключения микропроцессорных терминалов РЗА пока остается открытым. Результаты проводимого анализа помогут обосновать выбор наилучших схемных решений для подключения микропроцессорных терминалов защит с последующей их реализацией на новых тяговых подстанциях.

### **Анализ основных мировых и отечественных тенденций развития техники и технологий микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики**

Произведенный анализ литературных источников [10–14] показал, что развитие микропроцессорных устройств РЗА (МУРЗ) происходит преимущественно посредством следующих направлений:

- применение цифровой техники и информационных технологий при создании систем РЗА (базирование используемых технологий на стандарте МЭК 61850 и концепции цифровой подстанции, развитие систем автоматизированного проектирования устройств РЗА);

- повышение функциональной и аппаратной интеграции за счет применения адаптивных принципов, увеличения гибкости используемой функциональной и аппаратной архитектуры схем и устройств МУРЗ;

- обеспечение надежности и кибербезопасности функционирования устройств и систем;

- оптимизация и совершенствование всех этапов жизненного цикла устройств РЗА, начиная от их проектирования и заканчивая системой технического обслуживания и диагностики.

Одним из важных и нерешенных на данный момент времени аспектов функционирования МУРЗ является вопрос надежности их работы. Отечественные и зарубежные исследователи отмечают необходимость пересмотра подходов к оценке надежности (проектной и эксплуатационной) комплексов РЗА, реализуемых по технологии цифровой подстанции в соответствии с протоколом МЭК 61850. Также подчеркивается важность разработки новых и корректировки существующих методик оценки основных показателей надежности (поток отказов, время восстановления и пр.) [9, 11–18].

Также отмечается необходимость организации непрерывного мониторинга показателей надежности устройств РЗА цифровых подстанций, что позволит проработать решения в области повышения надежности МУРЗ. Концептуальные вопросы по развитию РЗА на базе МЭК 61850 предусматривают поэтапный переход от «контроллерного» исполнения устройств РЗА к «компьютерному» виду и рассматриваются многовариантно – в краткосрочной, среднесрочной или долгосрочной перспективе [9, 11–18].

Важно отметить, что используемые в настоящее время методы расчета и контроля реальных показателей аппаратной и структурной надежности комплексов РЗА необходимо проанализировать на предмет применимости в условиях эксплуатации и проектирования цифровых подстанций. Также необходима наработка базы данных используемого оборудования с количественными значениями показателей надежности устройств и комплексов РЗА и сравнительная оценка различных архитектур РЗА.

### **Оценка различных архитектур при подключении микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики**

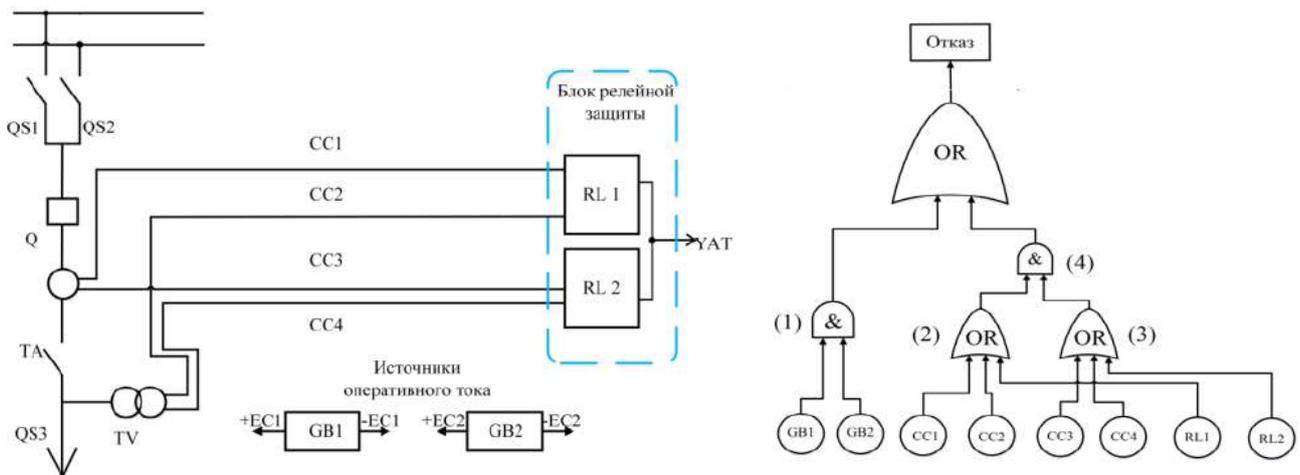
Произведем оценку схем подключения МУРЗ на цифровой тяговой подстанции, составив структурные схемы, схемы замещения по надежности, и выполним расчет и анализ показателей надежности цифровой тяговой подстанции для трех вариантов конфигурации схемы локальной вычислительной сети [15–17]: традиционная схема; схема соединения «двойная звезда»; схема соединения «двойное кольцо».

Расчет показателей надежности схем будем выполнять путем составления деревьев отказов, что облегчает процесс расчета топологически сложных схем. Составление схем и деревьев отказа является логическим процессом, который наиболее трудоемок и требует особого внимания, поэтому приведем его более детально.

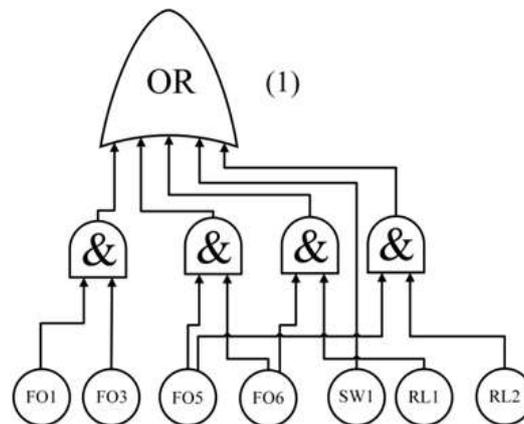
Расчеты показателей надежности произведем с использованием экспоненциального закона распределения отказов и показателей надежности оборудования. Рассматриваемые схемы подключения и соответствующие им деревья отказов приведены на рис. 1–4.

Для составления дерева отказов по каждой из трех упомянутых схем необходимо определить события, которые вызывают отказ всей системы.

Так для схемы (см. рис. 1) работа релейной защиты в аварийном режиме становится невозможной при одновременном отказе обеих аккумуляторных батарей – GB1 и GB2. Обозначим этот случай на дереве отказов логическим элементом «И» (&). Для прекращения работы терминала РЗА достаточно обрыва одного из кабелей, ведущих к измерительным трансформаторам, или отказа самого терминала. Этому варианту развития событий соответствует логический элемент «ИЛИ» (OR).



**Рис. 1.** Традиционная схема локальной вычислительной сети и дерево отказов  
**Fig.1.** Traditional LAN connection diagram and corresponding fault's tree



**Рис. 2.** Схема подключения локальной вычислительной сети «двойная звезда»  
и соответствующее ей дерево отказов  
**Fig.2.** Double Star LAN connection diagram with the corresponding fault's tree

Тем не менее отказом системы также будет являться прекращение работы обоих терминалов РЗА, поэтому внесем в дерево отказов элемент «И». Получаем схему, где отражены все возможные пути возникновения отказов системы (см. рис. 1).

Для цифровой подстанции протокол параллельного резервирования основывается на принципе параллельной работы двух независимых сетей и дублировании информационных сообщений. Каждый пакет информации, отправляемый устройством, дублируется и одновременно передается по обеим сетям. В нормальном режиме до принимающего устройства доходят оба пакета данных, но это происходит неодновременно из-за разной скорости передачи в независимых сетях. Принимающее устройство отбрасывает

последний полученный пакет в нормальном режиме или принимает единственный пакет в случае отказа одной из сетей, за счет чего возможна беспроводная передача данных.

Такому протоколу соответствует схема «двойная звезда», представляющая собой радиальную структуру с сетевыми коммутаторами в центре и устройствами полевого уровня на периферии. Для обеспечения надежности работы систем РЗА требуются основная и резервная защиты, что для схемы (рис. 2) достигается использованием полевых устройств с резервированными сетевыми портами, подключенных к мультиплексорам MU с помощью оптических кабелей FO, и парой терминалов РЗА с резервированными сетевыми портами, также под-

ключенных к коммутаторам SW и выполняющих функции основной и резервной защит.

В этой схеме элементов гораздо больше, чем в традиционной, поэтому дерево отказов представляется более разветвленной структурой (рис. 2). Для реализации протокола применим схему «двойное кольцо», топология которой приведена на рис. 3.

К отказу системы РЗА может привести отсутствие показаний тока или напряжения, т. е. одновременный отказ кабелей FO1 и FO3, отказ кабелей FO5, FO6 между коммутатором и терминалами РЗА, отказ коммутатора SW1. Также к отказу работы сети может привести нарушение связи между коммутатором и терминалом РЗА при отказе второго терминала РЗА.

Варианты развития событий для схемы «двойная звезда» показаны на рис. 3.

Отказ работы сети также может вызвать нарушение связи между коммутатором и терминалом РЗА при отказе второго терминала РЗА. На рис. 3. этому случаю соответствует элемент, обозначенный как (1). Элемент (1) рассматривает события в первой независимой ветви «звезды», элемент (2) – во второй ветви. Элемент (3) учитывает, что при отказе одной сети вторая продолжает работать независимо. Элементы (4)

и (5) описывают работу устройства сопряжения с шиной (УСШ), к которым подключены измерительные приборы. Элемент (7) отражает требование к питанию цепи оперативным током, элемент (8) – к резервированию защит.

Далее составим дерево отказов для следующей схемы («двойное кольцо»). Каждое измерительное устройство в этой схеме подключается к двум УСШ, которые последовательно соединены оптическими кабелями, каждый с соответствующим терминалом РЗА и между собой. Для замыкания кольца также соединяются последовательно терминалы РЗА.

В схеме соединения локальной вычислительной сети (ЛВС) «двойное кольцо» каждый элемент, участвующий в системе РЗА, продублирован, однако все элементы соединены последовательно. Отказом системы является одновременный отказ двух точек «кольца» или одновременный отказ обоих источников оперативного тока. Отметим, что отказом не является нарушение в работе соединительных кабелей FO3 и FO4, которые необходимы для реализации протокола HSR. При отказе этих кабелей функциональность схемы не меняется, но снижается скорость передачи данных, увеличивается вероятность отказа системы.

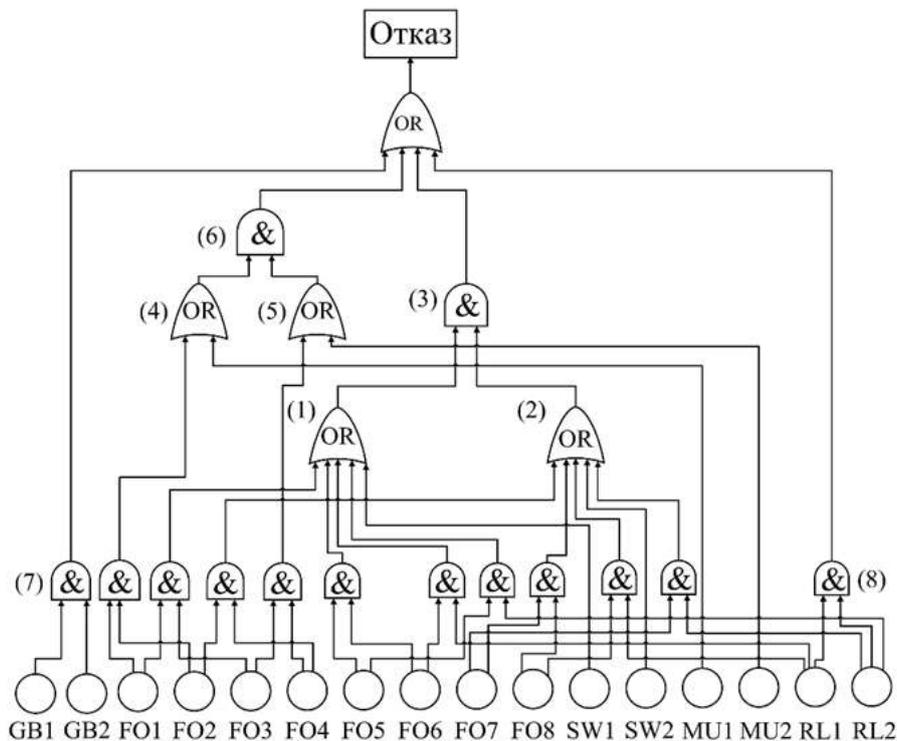
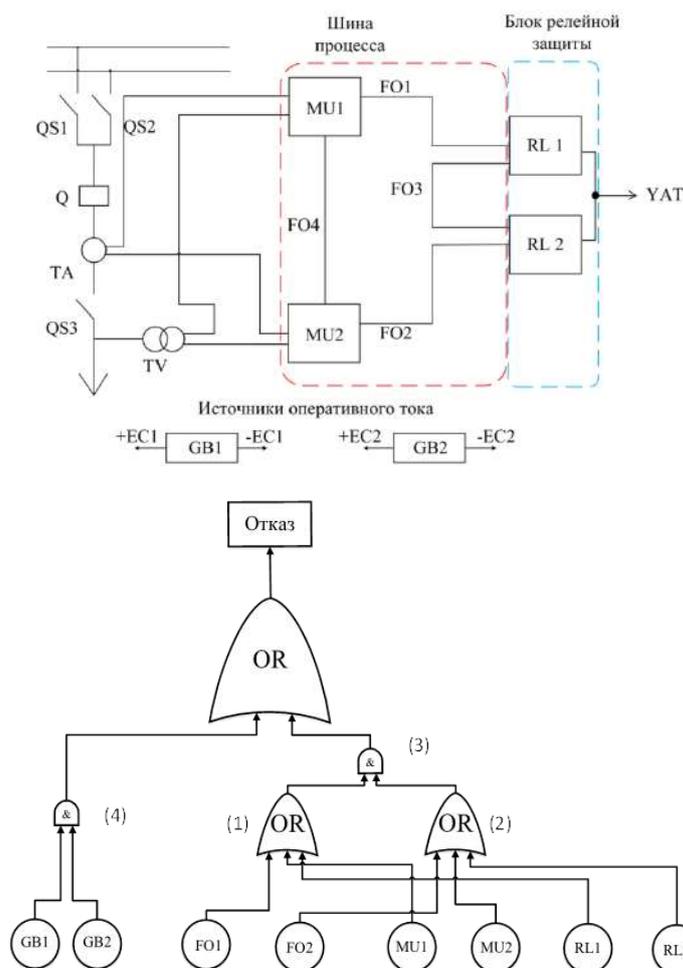


Рис. 3. Детализированное дерево отказов для схемы «двойная звезда»

Fig. 3. Detailed fault's tree for double star LAN connection diagram



**Рис. 4.** Схема подключения локальной вычислительной сети «двойное кольцо» и соответствующее ей дерево отказов

**Fig. 4.** Double ring LAN connection diagram with the corresponding fault's tree

В расчетах примем следующие упрощения и исходные данные:

– пренебрегаем показателями надежности измерительных трансформаторов и силовых коммутационных аппаратов, поскольку исследуется схемная надежность топологии;

– расчетный период, на котором производится расчет, примем равным 4 380 ч, что соответствует периодичности технических осмотров аппаратуры и вторичных цепей подстанции и позволяет не учитывать параметры восстановления оборудования;

– параметры по надежности оборудования примем для оборудования, применяемого на действующей подстанции.

Используемый экспоненциальный закон распределения позволяет произвести расчеты основных показателей надежности для каждой из схем по классической методике [15–18].

**Таблица 1.** Исходные данные для расчета  
**Table 1.** Initial data for calculating

Наименование оборудования	Среднее время наработки на отказ, ч	Интенсивность отказов, 1/ч
Терминал P3 SIE-MENS 7SA522	125 000	–
Кабельная линия (1 м КВВГЭнг(А)-LS 7×4)	–	$5,87 \cdot 10^{-9}$
Волоконно-оптическая линия (1 км)	–	$1,19 \cdot 10^{-9}$
Устройство сопряжения с шиной процесса ENMU	280 000	–
Коммутатор MOXA EDS-408A	363 000	–
Батареи аккумуляторные	–	$2,50 \cdot 10^{-7}$

### Полученные результаты и их обсуждение

Результаты численной оценки вероятности безотказной работы трех перечисленных схем подключения МУРЗ сведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты расчета для схем устройств релейной защиты и автоматики различной топологии  
**Table 2.** Calculation results for RPA schemes of various topologies

Номер схемы	Название схемы	Вероятность безотказной работы, $R$
1	Традиционная	0,9979914
2	«Двойная звезда»	0,9984287
3	«Двойное кольцо»	0,9975560

По результатам произведенных расчетов при переходе от традиционных к новым коммуникационным стандартам и цифровым устройствам существенного изменения результирующих значений показателей надежности не происходит. Традиционная схема подключения РЗА, в сравнении со схемой «двойное кольцо», даже имеет  $R(t)$  несколько выше ( $0,9975560 < 0,9978814$ ).

Использование схемы «двойная звезда», приводит к незначительному повышению показателей надежности: вероятность безотказной работы со значения 0,9979914 (традиционная схема) до 0,9984287 («двойная звезда»).

Часть параметров оборудования, которые используются в качестве исходных данных, взять для расчета не представляется возможным ввиду их отсутствия у завода-изготовителя, что еще раз подчеркивает важность создания базы данных нового цифрового и соединительного оборудования с указанием

количественных значений показателей надежности устройств и комплексов РЗА.

Таким образом, при сравнении характеристик по надежности двух рекомендованных схем при переходе на новые коммуникационные стандарты предпочтение следует отдавать схеме «двойная звезда».

### Заключение

Проведенное исследование позволило структурировать основные тенденции развития техники и технологий микропроцессорных РЗА, применяемых в настоящее время.

Выполненный анализ трех вариантов схем подключения микропроцессорных терминалов защит и автоматики тяговых подстанций переменного тока и сравнительная оценка их показателей надежности позволяют заключить, что схема подключения МУРЗ «двойная звезда» более надежна, чем схема «двойное кольцо». Показатели надежности у новых схем не выше, чем у традиционной, что объясняется наличием в них нерезервируемых элементов и ИТ-оборудования, снижающих результирующие показатели надежности.

На надежность работы микропроцессорных систем РЗА влияет ряд факторов [11, 15–18]: степень подготовки персонала, надежность используемого оборудования, правильность его наладки и эксплуатации и т. д.

Новые возможности, которые открывает внедрение цифровых технологий, а именно, удаленная диагностика, мониторинг состояния оборудования и прогнозирование и т. п. открывают новые перспективы для более эффективной интеграции микропроцессорных РЗА на этапе перехода к цифровым технологиям в соответствии со стандартами МЭК 61850.

### Список литературы

1. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации : указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 89 с изм. и доп. от 16.12.2015.
2. Стратегия развития холдинга ОАО «РЖД» до 2030 года // ОАО «РЖД» : сайт. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=804> (дата обращения 22.09.2021).
3. Ливинский П.А., Гвоздев Д.Б. Инновационная энергосистема России в 2050 году // Энергетическая политика. 2017. № 6. С. 16–21.
4. Galeeva G. Digital transformation of the energy industry in the Russian economy // Sustainable Energy and Power Engineering 2021 (SUSE-2021) : E3S Web Conf. 2021. Vol. 288 : international Symposium. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801065>.
5. Бойченко О.В., Дячук В.С. Построение информационной модели цифровой подстанции на основе стандарта МЭК 61850 // Междунар. науч.-техн. журн. 2016. № 4-2 (46). С. 39–42.
6. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Куцкий А.П. Мультиагентные технологии управления в системах электроснабжения магистральных железных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 1 (37). С. 56–65.

7. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск : Изд-во ИрННТУ, 2015. 218 с.
8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent Traction Power Supply System // The power grid of the future : proceeding № 2. Magdeburg : Otto-von-Guericke University Magdeburg, 2013. P. 44–48.
9. Liu N., Panteli M., Crossley P.A. Reliability Evaluation of a Substation Automation System Communication Network Based on IEC 61850 // 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), 2014, pp. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2014.0057.
10. Агафонов А.И., Бростилова Т.Ю., Джазовский Н.Б. Современная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. 296 с.
11. Жуков А.В. Обобщение мировых тенденций развития техники и технологий электроэнергетики в области работы ИК В5 «Релейная защита и автоматика» релейной защиты и автоматике энергосистем (по итогам 47-ой сессии СИГРЭ 2018 г.) // CIGRE : сайт. URL: [http://cigre.ru/47/pdf/B5\\_%D0%96%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2.pdf](http://cigre.ru/47/pdf/B5_%D0%96%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2.pdf) (дата обращения 22.09.2021).
12. Tutorial on Networking for Digital Substations / R. Hunt, M. Zapella, C. Pimentel et al. // 72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). USA. TX. College Station, 2019. P. 1–15. DOI: 10.1109/CPRE.2019.8765874.
13. On the mathematical simulation of digital substation technological processes / V.I. Dubrov, R.G. Oganyan, N.D. Narakidze et al. // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Т. 12. № 2. P. 276–282.
14. Khrennikov A.Yu., Aleksandrov N.M. Approaches and experience in testing of digital substation primary equipment and relay protection // Elektroenergetika 2019 : proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Slovakia : Technical University of Kosice, 2019. P. 280–283.
15. Methodology for reliability indices determination in electric power substation / J.D. Barbosa, R. Santos, J.F. Romero et al. // IEEE Latin America Transactions. 2018. № 16. P. 1959–1968. DOI: 10.1109/TLA.2018.8447363.
16. Макашова С.И., Пинчуков П.С. Расчет показателей надежности цифровой подстанции // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2019. Т. 19. № 4. С. 41–51. DOI: 10.14529/power190405.
17. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Estimation of Digital Substation Reliability Indices // Advances in intelligent systems and computing : VIII International scientific Siberian Transport Forum. 2020. Vol 1. Т. 1115. P. 3–14. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2\_1.
18. Pinchukov P., Makasheva S. Improving methods for reliability assessment of electric power systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017. Vol. 692. P. 162–169.

### References

1. Ukaz Prezidenta RF ot 7 iyulya 2011 g. № 899 “Ob utverzhdenii prioritnykh napravleniy razvitiya nauki, tekhnologii i tekhniki v Rossiyskoy Federatsii i perechnya kriticheskikh tekhnologii Rossiyskoy Federatsii”. S izmeneniyami i dopolnениями ot 16 dekabrya 2015 g. [Ordinance of the President of Russia of 07.07.2011 No. 899 “On approval of priority directions of scientific, technological and engineering development in the Russian Federation the list of critical technologies of the Russian Federation”. Amended and supplemented on 16.12.2015]. Moscow, 2015.
2. Strategiya razvitiya holdinga OAO “RZHD” do 2030 goda [JSC “Russian Railways” Development strategy until 2030]. URL: <http://doc.rzd.ru> (Accessed 22.09.2021).
3. Livinsky P.A., Gvozdev D.B. Innovacionnaya energosistema Rossii v 2050 godu [Russian innovative energy system in 2050]. *Energeticheskaya politika [Energy politic]*. 2017, No. 6, pp. 16–21.
4. Galeeva G. Digital transformation of the energy industry in the Russian economy 2021 *International Symposium “Sustainable Energy and Power Engineering 2021” (SUSE-2021). E3S Web Conf.* Vol. 288, pp. 01065. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801065>.
5. Boychenko O.V., Dyachuk V.S. Postroenie informacionnoy modeli cifrovoy podstancii na osnove standarta MEK 61850 [Creating the information models of a digital substation based on the IEC 61850 standard]. *Mezhdunarodnyy nauchno-tekhnicheskij zhurnal [International scientific and technical journal]*. 2016, No. 4-2(46), pp. 39–42.
6. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Kutsij A.P. Mul'tiagentnye tekhnologii upravleniya v sistemah elektrosnabzheniya magistral'nyh zheleznih dorog [Multi-agent control technologies in power systems of main railways]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technology]*. 2018, No. 1(37), pp. 56–65.
7. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intellektual'nye tekhnologii upravleniya kachestvom elektroenergii [Intelligent technologies of power quality management]. Irkutsk: IrNITU Publ., 2015. 218 p.
8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent traction power supply system. *The power grid of the future*. Proceeding № 2. Otto-von-Guericke University Magdeburg, Magdeburg, 2013. P. 44–48.
9. Liu N., Panteli M., Crossley P.A. Reliability evaluation of a substation automation system communication network based on IEC 61850. *12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014)*, 2014, pp. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2014.0057.
10. Agafonov A.I., Brostilova T.Yu., Dzhazovskiy N.B. Sovremennaya releynaya zashchita i avtomatika elektroenergeticheskikh sistem: uchebnoe posobie [Modern relay protection and automation of electrical power systems: tutorial]. Penza: PGU Publ., 2017. 296 p.
11. Zhukov A.V. Obobshchenie mirovykh tendenciy razvitiya tekhniki i tekhnologii elektroenergetiki v oblasti raboty IK V5 “Releynaya zashchita i avtomatika” releynoy zashchity i avtomatiki energosistem (po itogam 47-oj sessii SIGRE 2018 g.) [Generalization of world trends in the equipment and technologies development of electric power industry in the field of operation of IC V5 “Relay protection and automation” of relay protection and automation of power systems (based on the results of the 47th

session of CIGRE in 2018)]. URL: [http://cigre.ru/47/pdf/B5\\_%D0%96%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2.pdf](http://cigre.ru/47/pdf/B5_%D0%96%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2.pdf) (Accessed 22.09.2021).

12. Hunt R., Zapella M., Pimentel C., Silvano G. Tutorial on Networking for Digital Substations. *72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. USA. TX. College Station, 2019. Pp. 1–15. DOI: 10.1109/CPRE.2019.8765874.

13. Dubrov V.I., Oganyan R.G., Narakidze N.D., Aleksanyan G.K. On the mathematical simulation of digital substation technological processes. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. T. 12. No. 2. Pp. 276–282.

14. Khrennikov A.Yu., Aleksandrov N.M. Approaches and experience in testing of digital substation primary equipment and relay protection. *Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, Elektroenergetika*, 2019. 2019. No. 10. pp. 280–283.

15. Barbosa J.D., Santos R., Romero J.F., Asano P.T., Neto A.V., Junior J.R., Junior J.B., Cugnasca P.S. Methodology for Reliability Indices Determination in Electric Power Substation. *IEEE Latin America Transactions*, 2018. No. 16, pp. 1959–1968. DOI: 10.1109/TLA.2018.8447363.

16. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Raschet pokazatelej nadezhnosti tsifrovoj podstancii [Digital Substation Reliability Evaluation]. *Vestnik YUUrGU. Seriya "Energetika" [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering]*. 2019. Vol. 19, No. 4, pp. 41–51. DOI: 10.14529/power190405.

17. Pinchukov P., Makasheva S. Estimation of Digital Substation Reliability Indices. *VIII International scientific Siberian Transport Forum, Vol. 1, Book series: Advances in intelligent systems and computing*, 2020. Vol. 1115. Pp. 3–14. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-21.

18. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Improving methods for reliability assessment of electric power systems *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017. Vol. 692. pp. 162–169. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1\_17.

#### Информация об авторах

**Пинчуков Павел Сергеевич** – канд. техн. наук, доц. кафедры систем электроснабжения, директор Электроэнергетического института, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: [pinchukov-pavel@mail.ru](mailto:pinchukov-pavel@mail.ru).

#### Information about the authors

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

## Применение радиолокационного зондирования подповерхностных исследований при оценке сходов грузовых вагонов

Л. В. Мартыненко✉, Ю. В. Воронова, В. А. Иванова

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

✉ liuba.martinenko@yandex.ru

### Резюме

В статье рассматриваются причины возникновения сходов подвижного состава. В настоящее время сходы составов расследуют по внешним отклонениям деталей и узлов, но не затрагивают внутреннюю сторону развития аварийных ситуаций. Особенно хотелось отметить отклонения, которые зависят от структуры земляного полотна и контролируются центром диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры. Но не всегда выявляются причины, которые кроются в состоянии земляного полотна и принадлежности участка к горно-рельефной местности или прямому участку, где проходят грунтовые воды. От этого зависит структура земляного полотна и увлажненность слоев, влияющих на образование просадок пути, которые и могут привести к опасным ситуациям при движении подвижного состава. Для наблюдения за такими участками нужна определенная система, отслеживающая состояние пути не по внешним признакам, а именно по слоям земляного полотна. Такой является георадиолокационная система, позволяющая «просвечивать» горные породы с помощью радиоволн и детально определять отклонения и изменения в структуре земляного полотна, а также выявлять повышенную увлажненность слоев для своевременного предотвращения размыва грунта и его проседания под насыпью. Данная методика исследования является не только экономичной, но и достаточно удобной при обследовании больших площадей железнодорожного полотна.

### Ключевые слова

центр диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры, структура земляного полотна, аварийные ситуации, горно-рельефная местность, зоны увлажнения, сход подвижного состава, георадиолокационная система

### Для цитирования

Мартыненко Л. В. Применение радиолокационного зондирования подповерхностных исследований при оценке сходов грузовых вагонов / Л. В. Мартыненко, Ю. В. Воронова, В. А. Иванова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 96–103. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).96-103

### Информация о статье

поступила в редакцию: 01.12.2021, поступила после рецензирования: 08.12.2021, принята к публикации: 10.12.2021

## Application of radar sounding of subsurface studies in the assessment of freight car descents

L. V. Martynenko✉, Yu. V. Voronova, V. A. Ivanova

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ liuba.martinenko@yandex.ru

### Abstract

The article discusses the causes of rolling stock derailments. At present, train derailments are investigated for external deviations of parts and assemblies, without considering the internal side of the development of emergency situations. The deviations that depend on the structure of the roadbed and are controlled by the center for diagnostics and monitoring of infrastructure devices should be noted. But the reasons are not always revealed which lie in the condition of the roadbed and the belonging of the site to the mountainous terrain or the direct section where the groundwater passes. It is the structure of the roadbed and the moisture content of the layers that affect the formation of subsidence of the track, which may result in dangerous situations when moving rolling stock. To monitor such areas, a certain system is needed that tracks the state of the path not by external signs, but by layers of the roadbed. That is what a geo-radiolocation system is that allows to “shine through” rocks with the help of radio waves and to determine in detail the deviations and changes in the structure of the roadbed, as well as to identify increased moisture content of layers for timely prevention of soil erosion and subsidence under the embankment. This research technique is not only economical, but also quite convenient when examining large areas of the railway track.

### Keywords

the center for diagnostics and monitoring of infrastructure devices, the structure of the roadbed, emergency situations, mountainous terrain, humidification zones, rolling stock derailment, geo-radar system

**For citation**

Martynenko L. V., Voronova Yu. V., Ivanova V. A. Primenenie radiolokatsionnogo zondirovaniya podpoverkhnostnykh issledovaniy pri otsenke skhodov gruzovykh vagonov [Application of radar sounding of subsurface studies in the assessment of freight car descents]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 96–103. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).96-103

**Article Info**

Received: 01.12.2021, Revised: 08.12.2021, Accepted: 10.12.2021

**Введение**

В настоящее время используются различные приборы и оборудование по обнаружению и устранению отклонений, которые возникают в процессе движения подвижного состава. Большинство отклонений широко известны и изучены, однако не всегда можно достоверно указать причину их возникновения, так как некоторые отклонения могут находиться не на поверхности пути или в узлах и деталях состава, а внутри земляного полотна. Данные отклонения приводят к его проседанию, соответственно, образованию на поверхности просадки, т. е. проседание грунта за счет его деформации и изменения или смещения слоев грунта.

В результате изменения структуры земляного полотна понижается общая сопротивляемость внешнему воздействию, особенно это касается железнодорожного полотна, которое постоянно испытывает высокие вибрационные нагрузки от проходящих составов. Существуют и другие факторы, которые влияют на изменение слоев грунта, возникающие при пластической деформации глинистых грунтов, деформации насыпи и т. д.

**Методика определения структурного изменения земляного полотна**

С ростом грузооборота увеличилась нагрузка на путь, которая повлияла на сопротивляемость земляного полотна внешним воздействиям со стороны эксплуатируемого подвижного состава [1]. Состояние земляного полотна определяется наличием большого количества отклонений, влияющих на динамику вагона при движении, а в некоторых случаях приводящих к возникновению больших динамических возмущений и сходу подвижного состава. Отклонения на железнодорожном полотне определяются изменением структуры балластного слоя или сдвигом грунтов, что ведет к образованию дефектов поверхности пути. При проседании земляного полотна возникает самое распространенное отклонение – просадка, от ее

степени зависит динамика вагона при прохождении данного участка. Если глубина отклонения не будет соответствовать установленному скоростному режиму подвижного состава, то может произойти сход, который повлечет за собой большой материальный ущерб [2]. Структурное изменение грунтов приводит к проседанию земляного полотна, которое можно своевременно обнаружить и устранить. Для решения данной проблемы применяется зондирование земляного полотна. Центр диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры контролируют изменения, происходящие в слоях грунта, или их смещение с помощью специализированного оборудования, которое магнитными импульсами считывает информацию, что позволяет своевременно предотвратить отклонения, возникающие на поверхности железнодорожного полотна и влияющие на состав при движении на данном участке [3].

**Применение георадиолокационной системы**

На Восточно-Сибирской железной дороге для более качественного исследования используются диагностический комплекс «Интеграл», оснащенный специализированным оборудованием: дефектоскопом, системами измерения, сканирования земляного полотна на достаточно большую глубину, георадиолокацией, а также системой контроля технического состояния параметров контактной сети, автоматики и радиосвязи [4]. Данные, полученные с этих систем, классифицируются по количественным и качественным характеристикам, после чего заносятся в систему диагностики и мониторинга инфраструктуры (СДМИ), которая является частью Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой (ЕК АСУИ).

Принцип работы многоканальной георадарной системы (МГС) основан на применении магнитного излучения, которое обнаруживает и регистрирует сигналы на определенной глубине и предоставляет достоверную информа-

цию о состоянии слоев земляного полотна. Такими данными являются определение взаимодействия сухого и влажного грунта [5].

На рис. 1 показано подвагонное оборудование, состоящее из трех антенных блоков, которые позволяют обнаружить опасные отклонения в железнодорожном полотне. Данное оборудование выявляет изменения на начальном этапе, в связи с чем принимаются необходимые меры для нормализации слоев земляного полотна [6].



**Рис. 1.** Крепление антенных блоков под кузовом вагона

**Fig. 1.** Mounting of antenna blocks under the car body

В табл. 1 представлены наименования параметров МГС при скоростях до 120 км/ч. МГС позволяет:

- определять изменения и отклонения в структуре слоев земляного полотна, а также проверять наличие посторонних примесей и увеличенную увлажненность слоев;

- выявлять дополнительные несоответствия, связанные со смешиванием балластного слоя с другими материалами, которые не должны входить в состав;

- выявлять отклонения в верхних слоях полотна, а также изменения цветовой гаммы в слоях полотна, которая зависит от содержащихся в ней в определенном процентном соотношении горных пород;

- выделять пониженную плотность слоев, зависящую от структуры материалов и изменяющуюся при взаимодействии с водой или другими материалами;

- определять места, в которых присутствуют высокопористые материалы, влияющие на изменение структуры полотна и ограничи-

вающие взаимодействие слоев между собой и с верхними слоями [7].

**Таблица 1.** Параметры георадиолокационной системы

**Table 1.** Parameters of the georadolocation system

Наименование параметров	Нормативное Значение параметров
Производительность на один канал, трасс/с	320
Глубина зондирования, м	0,8–8
Разрешающая способность, м	0,03–0,25
Работа с отрывом, м	0,25–0,45
Скорость передачи данных, Мбит/с	10/100

В настоящее время на ОАО РЖД применяются два основных вида железнодорожного пути: с балластным слоем и без него. Безбалластный тип не предназначен для земляного полотна железнодорожного пути, потому что применяется только для устойчивых сооружений, где проходят не только поезда, но и автомобили разных типов, в том числе и большегрузы. Любое проседание может привести к деформации постройки, к зарождению трещин и нарушению целостности конструкции, что может привести к излому и разрушению, например, моста. Это может повлечь гибель людей и огромные экономические потери, а также затруднить передвижение всех видов транспорта. Для подвижного состава используется только грунтовое земляное полотно (более 99 %), так как должны учитываться многочисленные факторы, влияющие на динамику движения всего состава. Динамическая нагрузка различна на разных участках пути, здесь играет большую роль кривизна пути, скорость, возвышение рельса и техническое состояние вагона и пути. Безбалластного типа не может быть, так как отсутствие равномерного распределения нагрузки может привести к аварийным ситуациям и большим экономическим потерям.

Балластный слой имеет особенную конструкцию, которая также препятствует боковым и продольным смещениям шпал. Нагрузка на рельсошпальную решетку должна равномерно распределяться по полотну, необходимо обеспечивать ее стабильное положение, т. е. упругость самого основания.

Основным материалом является щебень, он выдерживает нагрузку 1 000 кг на 1 куб. м. Укладка производится именно на этот материал, так как он может быть крупным для устойчивости рельсошпальной решетки либо мелким для ровной поверхности под шпалами. Одним из малоиспользуемых балластов является песчаный материал, в основном на мало эксплуатируемых участках пути (грузонапряженность до 25 млн т-км в год), так как не надежен для содержания пути. Также есть балласт, который мешает проникновению разных мелких частиц и применяется на загрязненных участках, он состоит из волокнистого материала.

При укладке разных балластных материалов применяется определенная структурированность, которая позволяет правильно распределить разные слои земляного полотна, чтобы нагрузка распределялась в соответствии с нормами (рис. 2).

Каждый слой в балласте должен быть определенной толщины: 25–55 см в зависимости от материала. Толщина песчаной подушки под щебнем, которая выравнивает поверхность и

компенсирует нагрузки, должна быть не менее 20–25 см в зависимости от класса линий. При скальных, крупноблочных и песчаных грунтах земляного полотна подушка не делается [8].

Принцип действия радиолокационной системы основан на сверхмощном магнитном излучении и зондировании структурных слоев земляного полотна. Данная аппаратура работает на малых и больших глубинах в зависимости от технических параметров системы. Радиолокационное зондирование (георадар) основано на применении магнитных импульсов, которые, в свою очередь, должны находить и определять слабые места в земляном полотне, выявлять нарушение структурированности слоев. Излучение при зондировании слоев может быть метрового и дециметрового диапазона, оно лучше всего отображает те границы и разделы слоев, где имеются различные электрофизические показатели, связанные с особенностью структуры полотна, и его несоответствия (табл. 2).

Георадиолокационное обследование является наиболее распространенным и удобным в использовании, специалист на определенном

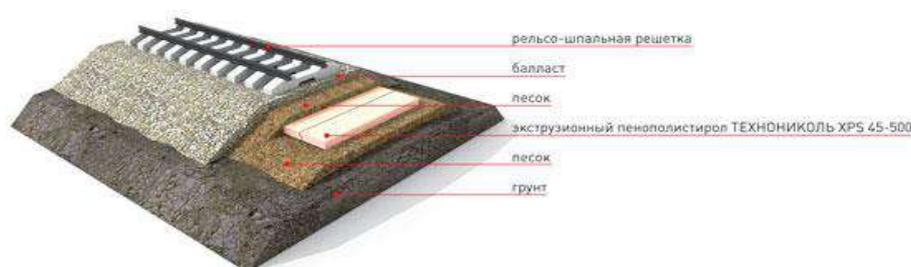


Рис. 2. Конструкция земляного полотна железной дороги  
Fig. 2. Construction of the railway roadbed

Таблица 2. Электрофизические параметры сред  
Table 2. Electrophysical parameters media

Среда	Относительная диэлектрическая проницаемость	Удельное затухание, дБ/м	Скорость распространения волн, м/нс
Воздух	1	0	0,300
Песок влажный	20–30	0,5–5	0,055–0,067
Песок сухой	4–6	0,01–1,5	0,122–0,150
Суглинок влажный	10–20	–	0,067–0,095
Суглинок сухой	4–6	–	0,122–0,150
Глина влажная	19–27	25–110	0,058–0,069
Глина сухая	2–7	3–14	0,113–0,212
Торф	50–78	–	0,034–0,042
Ил	13–27	–	0,058–0,083
Гранит	9	–	0,100
Бетон сухой	3–7	1–7	0,090–0,113
Асфальт сухой	3–6	2–15	0,122–0,173
Пресный лед	4	0,1–3,5	0,150
Пресная вода	81	0,10	0,033

участке может спокойно проверить состояние полотна при помощи специализированного оборудования, которое передает и принимает информацию антенной приемника. Излучатель, находящийся вблизи антенны, принимает сигнал и фиксирует месторасположение изменений на глубине, передает всю информацию на компьютер, где она затем обрабатывается.

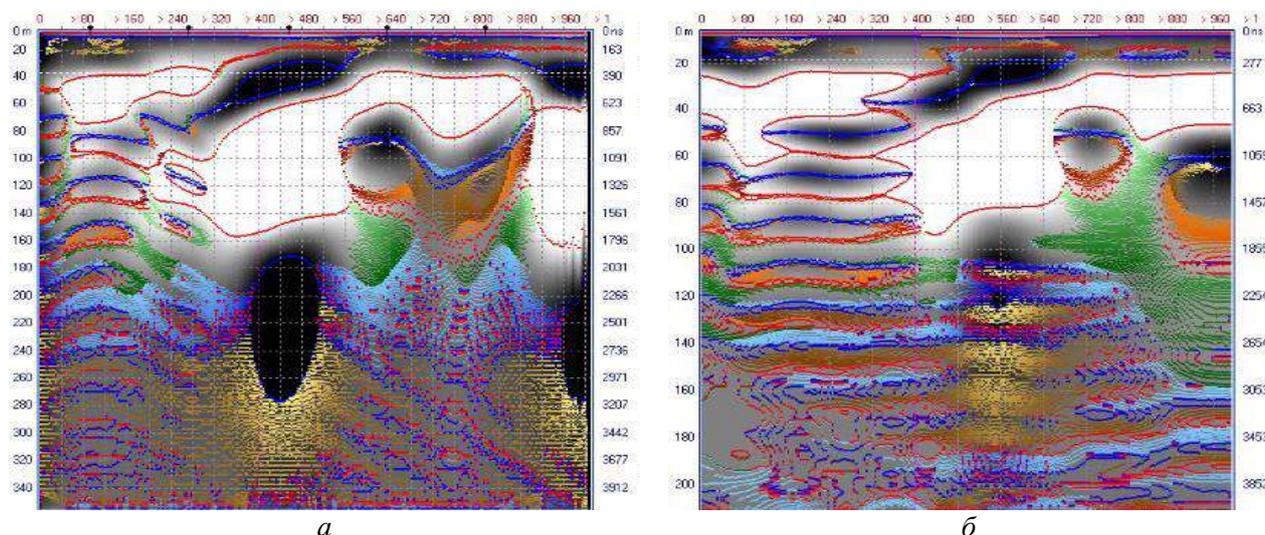
Результатом подповерхностного зондирования является выявление отклонений в структуре земляного полотна и несоответствие техническим параметрам, например, по высоте, увлажненности слоев и т. д., которые могут повлиять на распределение нагрузок между слоями и привести к изменению динамики движения подвижного состава, возникновению больших ударных нагрузок и даже потере устойчивости подвижного состава. На рис. 3 приведены радарограммы с частотой зондирования 10 МГц и шагом 1 и 50 м, цветом выделены участки, соответствующие распознаванию при данной частоте.

Необходимость расшифровки данных радарограмм объясняется несколькими причинами. Во-первых, для того чтобы решить возникшую проблему, нужно выполнить несколько замеров на разной глубине и на разных участках. Во-вторых, необходимо, чтобы используемое оборудование работало исправно на любой глубине и не зависело от климатических особенностей и различного рода помех, которые могут прерывать сигнал.

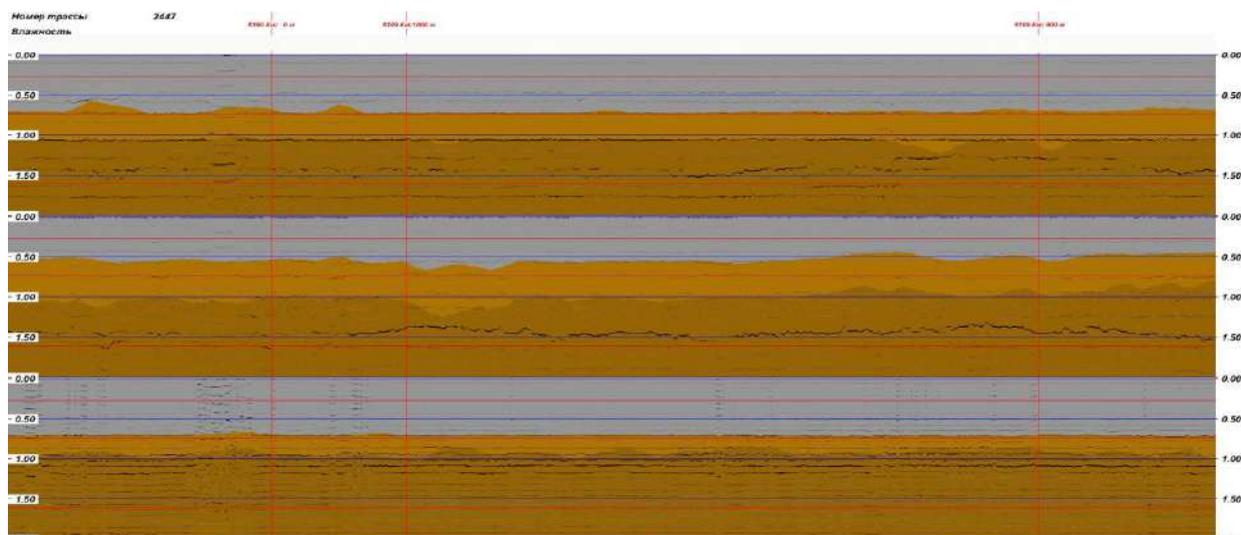
Заключительным этапом обработки радарограмм является решение поставленной задачи и определение достоверности снятых замеров в используемой методике. Решение проводится в два этапа. На первом анализируются основные особенности частоты и длины волны, на втором этапе – ограничения, связанные с определенным местом. Обработка радарограмм осуществляется в специальных программных комплексах: GeoScan32, Георадар-эксперт, Крот, Easy3D и Prism. В научных целях используются также система моделирования георадарных данных GprMax, основанная на методе конечных разностей, и свободно распространяемый по лицензии GNU продукт MatGPR, написанный на базе Matlab.

Результаты поездок (ведомости выходных форм) загружаются в программное обеспечение ЕК АСУИ СДМИ, далее работники Центра диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры производят обработку и анализ полученных данных, впоследствии отправляют письма в адреса дистанций пути с актуализированными результатами для использования при планировании текущего содержания пути и работ капитального характера [9]. Анализ радарограммы позволяет принять решения, связанные с устранением опасных отклонений в структуре земляного полотна.

На рис. 4 приведена радарограмма горно-перевального участка Восточно-Сибирской железной дороги, которая показывает увлаж-



**Рис. 3.** Радарограмма с частотой зондирования 10 МГц:  
*а* – шаг зондирования 1 м; *б* – шаг зондирования 50 м  
**Fig. 3.** Radarogram with a sounding frequency of 10 MHz:  
*a* – a sounding step of 1 m; *b* – a sounding step of 50 m



**Рис. 4.** Радарограмма (профиль зондируемого земляного полотна) по увлажнению слоев земляного полотна

**Fig. 4.** Radarogram (profile of the probed roadbed) for moistening the layers of the roadbed)

ненность слоев земляного полотна на одном километре пути [10]. В пределах данного участка можно определить отклонение по влажности подбалластных слоев и деформацию слоев грунта [11].

Анализ данных (табл. 3) позволяет оценить изменение влажности на разных участках пути. Земляное полотно постоянно подвергается воздействию воды, что приводит к повышенной влажности слоев грунта [12, 13]. Это нарушает прочностные характеристики слоев и способствует проседанию грунта, также нарушается устойчивость откосов и земляного по-

лотна [14, 15]. Повышенная влажность – это не только климатические осадки, но и расположение над уровнем моря, прохождение грунтовых вод [16, 17].

Из приведенных данных видно, что на исследуемых участках пути наблюдалось повышение влажности верхней части разреза подбалластного основания, которая составляет около 67 %. При дополнительном анализе гидрологических данных это может послужить мерой оценки качества работы водоотводных сооружений (канав, дренажа и пр.) [18].

**Таблица 3.** Ведомость участка пути с деформациями земляного полотна

**Table 3.** List of sections of the track with defects of the roadbed

№	Участки с деформациями земляного полотна, м	
	Нарушения по данным геодезии	Размер
1	11,7 (увлажнение)	11,7
2	13,8 (балластное корыто)	13,8
3	31,8 (балластное углубление)	31,8
4	17,5 (увлажнение)	17,5
5	70,4 (балластное углубление)	70,4
6	16,0 (увлажнение)	16,0
7	22,0 (увлажнение)	22,0
8	58,5 (понижение основной площадки)	58,5
9	14,3 (увлажнение)	14,3
10	21,4 (увлажнение)	21,4
11	32,9 (балластное углубление)	32,9
12	13,2 (увлажнение)	13,2
13	15,9 (увлажнение)	15,9
14	23,5 (увлажнение)	23,5
15	22,4 (увлажнение)	22,4

**Заключение**

В данной статье рассмотрена многофункциональная радиолокационная система, с помощью которой были проведены исследования слоев земляного полотна на соответствие нормам увлажненности и структуре грунтов земляного полотна. Данная система показала, что при разной частоте можно выявить отклонения на глубине от 10 до 50 м. Это является оптимальным решением для контроля и сохранности железнодорожного полотна и своевременного выявления и устранения просадок пути и несоответствий в структуре слоев. При использовании георадиолокационной системы были получены данные, в которых выявлены нарушения в нижних слоях железнодорожного пути,

где повышена влажность. На таких участках сходы происходят чаще. Данная методика исследования подповерхностных слоев земляного полотна является определенно высокоточной по сравнению с другими геофизическими методами и может обеспечить получение непрерывной и достоверной информации о состоянии объектов земляного полотна. Использование этой методики поможет существенно повысить качество проектных решений при проектировании и снизить затраты на текущее содержание и ремонт железнодорожного полотна, а также уменьшить количество сходов, связанных с нарушением рельефа полотна.

**Список литературы**

1. Пузырев Н.Н. Временные поля отраженных волн и метод эффективных параметров. Новосибирск : Наука, 1979.
2. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию / М. : Изд-во МГУ, 1998.
3. Особенности обработки георадиолокационных данных, получаемых в непрерывном скоростном режиме / В.И. Колесников, В.А. Явна, В.Б. Воробьев и др. // Современные проблемы путевого комплекса. Повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований. М. : МИИТ, 2004.
4. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных : учеб. пособие. М., 2008. 192 с.
5. Воробьев В.Б. Диагностика балластного слоя георадиолокационным методом // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 8. С. 2–8.
6. Марков А.А. Кузнецова Е.А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов : практ. пособие. В 2 кн. Кн. 1. Основы. СПб. : Культ Информ Пресс, 2010. 292 с.
7. Шнейерсон М.Б., Жуков А.П., Белоусов А.В. Технология и методика пространственной сейсморазведки. М. : Спектр, 2009. 112 с.
8. Диагностический комплекс «Интеграл» // ТВЕМА : сайт. URL: <http://www.tvema.ru/398> (дата обращения 18.11.2021). (исправила название, авторское на сайте по указанной ссылке не нашла)
9. Положение о порядке расшифровки результатов контроля съемных и мобильных средств дефектоскопии : распоряжение ЦДИ ОАО «РЖД» : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 03.07.2012 №12112. Доступ из справ.-прав. системы «Гарант» в локал. сети.
10. Сейсморазведка с вибрационными источниками / А.П. Жуков, С.В. Колесов, Г.А. Шехтман и др. Тверь : Герс, 2011. 412 с.
11. Хакиев З.Б. Определение свойств грунта георадиолокационным методом // Радиолокация и радиосвязь. М., 2009. Т. 1. С. 177–181.
12. СП 32-104-98 Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1 520 мм. Введ. 1999–01–01. М. : Изд-во стандартов. 1999. 90 с.
13. Модин И.Н., Большаков Д.К., Ерохин С.А. Построение объемных моделей геологической среды по данным электроразведки // Инженерная и рудная геофизика : тезисы докл. Геленджик : EAGE, 2010.
14. Порядок действий при неразрушающем контроле рельсов и оценке технического состояния рельсового хозяйства : утв. распоряжение ОАО «РЖД» от 08.12.2010 г. N 2537р // Доступ из справ.-прав. системы «Гарант» в локал. сети.
15. НТД/ЦП 1-2-3-2007. Классификация дефектов рельсов. Каталог дефектов рельсов. Признаки дефектных и остродефектных рельсов / ОАО «РЖД», Департамент пути и сооружений. М., 2007.
16. Технологический регламент диагностики и режимных наблюдений объектов земляного полотна для постоянной эксплуатации / ОАО «РЖД. МИИТ. М. : НИИТКД, 2007. 92 с.
17. Сейсморазведка : справочник геофизика / под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. М. : Недра, 1981. 464 с.
18. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути : утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2791р от 29 декабря 2012 г. // Доступ из справ.-прав. системы «Гарант» в локал. сети.

**References**

1. Puzyrev N.N. Vremenniye polya otrazhennikh voln I metod ehffektivnikh parametrov [Time fields of reflected waves and the method of effective parameters]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1979.
2. Vladov M.L., Starovoitov A.V. Vvedeniye v geo-radiolocatsiyu [Introduction to geo-radiolocation]. M.: Publishing House of Moscow State University, 1998.
3. Kolesnikov V.I., Yavna V.A., Vorobyev V.B. et al. Osobennosti obrabotki georadiolokatsionnykh dannykh poluchaemykh v nepreryvnom slorostnom rezhime.[Features of processing geo-radar data obtained in continuous high-speed mode]. *Sovremen-*

*niye problemy putevogo kompleksa. Povyshenie kachestva podgotovki spetsialistov I urovnya nauchnykh issledovaniy* [Modern problems of the track complex. Improving the quality of training of specialists and the level of scientific research]. M.: MIIT Publ., 2004.

4. Starovoitov A.V. Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh [Interpretation of geo-radar data : textbook. manual] M., 2008. 192 p.
5. Vorobyev V.B. Diagnostika ballastnogo sloya georadiolokatsionnym metodom. [Diagnostics of the ballast layer by the georadiolocation method]. *Path and track economy*. 2011. No. 8. pp. 2–8.
6. Markov A.A., Kuznetsova E.A. Defektoskopiya relsov. Formirovaniye i analiz signalov [Rail Testing. Formation and analysis of signals : practice. stipend]. In 2 books. Book 1. Fundamentals. St. Petersburg : Cult Inform Press, 2010. 292 p.
7. Schneerson M.B., Zhukov A.P., Belousov A.V. Tekhnologiya I metodika prostranstvennoy seysmorazvedki [Technology and methodology of spatial seismic exploration]. M.: Spectrum, 2009. 112 p.
8. Diagnostic complex of automated assessment of the condition of technical infrastructure facilities related to ensuring the safety of train traffic «Integral». URL: <http://www.tvema.ru>.
9. Regulation on the procedure for decoding the results of the control of removable and mobile means of de-fectoscopy : order of the Central Department of JSC "Russian Railways" // SPS «Garant»
10. Zhukov A.P., Kolesov S.V., Shekhtman G.A., Schneerson M.B. Seysmorazvedka s vibratsionnymi istochnikami [Seismic exploration with vibration sources]. Tver: Gers, 2011. 412 p.
11. Khakiev Z.B. Opredelenie svoystv grunta georadiolokatsionnym metodom [Determination of soil properties by georadiolocation method]. *Radar and radio communication*. Moscow, 2009. Vol. 1. pp. 177–181.
12. Proektirovanie zemlyanogo polotna zheleznykh dorog kolei 1 520 mm. Vved. [Design of the roadbed of railways with a gauge of 1 520 mm. Introduction]. 1999-01-01. Moscow: Standards, 1999. 90 p.
13. Modin I.N., Bolshakov D., Erokhin S.A. Postroenie ob'emnykh modeley geologicheskoy sredy po dannym elektrorazvedki. [Construction of three-dimensional models of the geological environment according to electrical]. *Inzhenernaya I rudnaya geofizika* [Engineering and mining Geophysics]. Gelendzhik: EAGE, 2010.
14. Procedure for non-destructive testing of rails and assessment of the technical condition of rail facilities: order of JSC "Russian Railways" // SPS «Garant».
15. NTD/CP 1-2-3-2007. Classification of rail defects. Catalog of rail defects. Signs of defective and acute defective rails / JSC "Russian Railways", Department of Track and Structures. M., 2007.
16. Technological regulations for diagnostics and routine observations of roadbed objects for permanent operation./ JSC "RZD. MIIT. M.: NIITKD, 2007. 92 p.
17. Seismic exploration: handbook of geophysics. Edited by I.I. Gurvich, V.P. Nomokonov. M.: Nedra, 1981. 464 p.
18. Instructions on the current maintenance of the railway track, approved by the Order of JSC "Russian Railways" No. 2791r dated 12/29/2012.

#### 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](mailto:liuba.martinenko@yandex.ru).

**Воронова Юлия Владиславовна** – канд. техн. наук, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [voronova\\_uv@irgups.ru](mailto:voronova_uv@irgups.ru).

**Иванова Вероника Андреевна** – магистрант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [ivanova-veronika-98@mail.ru](mailto:ivanova-veronika-98@mail.ru).

#### Information about the authors

**Lyubov V. Martynenko** – Senior lecturer of the department Wagons and wagon economy, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [liuba.martinenko@yandex.ru](mailto:liuba.martinenko@yandex.ru).

**Yulia V. Voronova** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Wagons and Wagon Economy, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [voronova\\_uv@irgups.ru](mailto:voronova_uv@irgups.ru).

**Veronika A. Ivanova** – Master's student of ETTm, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [ivanova-veronika-98@mail.ru](mailto:ivanova-veronika-98@mail.ru).

## Методология проектирования интермодальных терминалов в транспортных системах

Ю. О. Полтавская✉

Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

✉ juliapoltavskaya@mail.ru

### Резюме

Экономическое планирование любого региона, страны предусматривает развитие транспортной отрасли и создает возможность перехода от решений, основанных на использовании ресурсов, расположенных вблизи производства и потребления, к решениям, основанным в наибольшей степени на специализации и прогрессирующем разделении труда. В этом аспекте перевозки грузов становятся более технологичными, сети поставок усложняются, охватывая большее количество регионов. Приобретают актуальность задачи по эффективному использованию различных видов транспорта и их взаимодействию в ходе перегрузочных операций в интермодальных терминалах. Представленная методология проектирования интермодальных терминалов в транспортных системах позволяет оценить разработанные проектные решения с учетом обслуживаемых транспортных единиц. В статье рассмотрена специфика интермодальных терминалов в связи с выполняемыми задачами и их роль в интеграции различных видов транспорта в грузовых перевозках. Цель проведенного исследования – отражение основных аспектов проектирования интермодального терминала. Стоимостные затраты являются не менее важными при принятии решения о планировке терминала, его оборудовании и эксплуатации. В работе перечислены некоторые статьи затрат, связанные с администрированием и системой управления терминалом, а также другими функциями и услугами, выполняемыми на нем. Однако при принятии решения о строительстве терминала необходимо учитывать более широкий спектр статей затрат, которые не были рассмотрены в рамках данной работы.

### Ключевые слова

интермодальный терминал, транспортная система, интермодальные транспортные единицы, перегрузочные операции, терминальное обслуживание, погрузочно-разгрузочные механизмы

### Для цитирования

Полтавская Ю. О. Методология проектирования интермодальных терминалов в транспортных системах // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 104–111. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).104-111

### Информация о статье

поступила в редакцию: 02.11.2021, поступила после рецензирования: 10.11.2021, принята к публикации: 15.11.2021

## Methodology of planning intermodal terminals in transport systems

Yu. O. Poltavskaya✉

Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

✉ juliapoltavskaya@mail.ru

### Abstract

Economic planning of any region or country provides for the development of the transport industry, and creates the possibility of transition from solutions based on the use of resources located close to production and consumption areas, to those based, to a great extent on specialization and progressive labor division. In this aspect, the transportation of goods is becoming more technological, supply chains - more complex, covering more regions. Tasks of the effective use of various modes of transport with their interaction during transshipment operations in intermodal terminals are becoming urgent. The presented methodology for the design of intermodal terminals in transport systems makes it possible to evaluate the developed design solutions taking into account the serviced transport units. The specificity of intermodal terminals in connection with the tasks performed and their role in the integration of various modes of transport in freight traffic are considered. The purpose of the study is to reflect the main aspects of the design of an intermodal terminal. Costs are equally important when deciding on terminal layout, equipment and operating technology. Listed are some of the cost items associated with the administration and management system of the terminal, as well as other functions and services performed on it. However, when deciding on the construction of the terminal, it is necessary to take into account a wider range of cost items including those not considered in this work.

### Keywords

intermodal terminal, transport system, intermodal transport units, transshipment operations, terminal services, loading and unloading mechanisms

**For citation**

Poltavskaya Yu. O. Metodologiya proyektirovaniya intermodal'nykh terminalov v transportnykh sistemakh [Methodology planning of intermodal terminals in transport systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 104–111. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).104-111

**Article info**

Received: 02.11.2021, Revised: 10.11.2021, Accepted: 15.11.2021

**Введение**

В сетях поставок транспорт играет важную роль в обеспечении наиболее эффективного и действенного потока сырья, готовой продукции из пунктов отправления в пункты назначения. Специфика сети поставок, определяемая характеристиками перевозимого груза, влияет на организацию транспортного процесса и применяемые технологии при осуществлении перегрузочных операций. Увеличение объемов грузопотока в экономических системах подразумевает повышение важности устойчивого функционирования транспорта. Такой подход требует не только эффективного использования различных видов транспорта, но и поиска оптимальных решений по размещению интермодальных терминалов в транспортной системе [1–5].

Важным элементом устойчивого функционирования транспортной отрасли является прогнозирование потребностей в перевозках. В сфере грузовых перевозок большая роль отводится развитию высокоскоростного железнодорожного транспорта для осуществления интермодальных перевозок. На эффективность грузовых перевозок оказывает влияние многоотраслевая интегрированная транспортная сеть, основанная на современной и оптимально спроектированной инфраструктуре [6, 7]. Динамичное развитие транспорта включает экологические и социальные факторы: негативное влияние транспорта на окружающую среду вызвано выбросами вредных веществ, повышенным уровнем шума и ростом количества дорожно-транспортных происшествий [8]. Снижение негативного воздействия транспорта является одним из приоритетов транспортной политики развитых государств. В этом аспекте предпринимается множество мероприятий, включая повышение конкурентоспособности железнодорожного сектора, увеличение доли железнодорожного транспорта в распределении грузопотоков и развитие интермодальных перевозок, в том числе поддержку создания транспортно-складских терминалов. В связи с

увеличением объемов интермодальных перевозок за последние годы актуальное значение приобретают задачи модернизации и строительства интермодальных терминалов [9]. Целью данной статьи является рассмотрение комплексной методологии проектирования интермодальных терминалов, позволяющей оценить разработанные проектные решения.

**Интермодальные терминалы и их характеристика**

Для реализации транспортных процессов требуются перегрузочные пункты, где происходят различные виды деятельности, связанные с обработкой грузов. Интермодальный терминал – это пространственный объект, связанный с инфраструктурой, позволяющий эффективно перегружать интермодальные транспортные единицы (ИТЕ) между транспортными средствами, принадлежащими к разным видам транспорта, и выполнять операции с этими единицами [4, 10, 11].

Интермодальные терминалы играют роль концентрации и распределения грузов в составе транспортно-логистических систем. Эти пункты предоставляют услуги перевалки, складирования, а также другие услуги, связанные с распределением грузов. В интермодальных транспортных сетях имеются перегрузочные терминалы разной мощности, выполняющие определенные функции и задачи [12, 13]. Классификация интермодальных терминалов может осуществляться по различным критериям:

- тип обслуживаемых ИТЕ;
- транспортные средства, участвующие в транспортировке и доставке ИТЕ;
- пропускная способность терминала, выраженная годовым оборотом ИТЕ;
- функции, выполняемые терминалом в интермодальных транспортных сетях.

Классификация интермодальных терминалов по основным признакам представлена в табл. 1 [14].

Функционально-пространственная организация работы интермодальных терминалов определяет их пропускную способность, т. е. способность принимать и отправлять определенное количество груза в единицу времени. Также это связано с расходами, которые зависят от количества обработанных грузов, от функциональных и пространственных решений и типа используемых погрузочно-разгрузочных механизмов.

**Таблица 1.** Классификация интермодальных терминалов

**Table 1.** Classification of intermodal terminals

Классификационный признак	Виды терминалов
1. Вид обслуживаемого груза	Терминалы для наливных грузов, тарно-штучных, навалочных и насыпных, контейнерные терминалы, терминалы типа «Ro-Ro» для обработки судов с горизонтальной погрузкой
2. Количество взаимодействующих видов транспорта	Унимодальные и интермодальные терминалы
3. Охват обслуживаемых потребителей	Терминалы общего пользования, для обслуживания группы клиентов в составе логистических центров, для собственных нужд грузовладельцев
4. Характер взаимодействия с другими объектами инфраструктуры	Автономные и интегрированные терминалы
5. Выполняемые функции в транспортной системе	Перевалочные терминалы, универсальные, специализированные, терминально-складские комплексы

В этом отношении пропускная способность интермодальных терминалов может быть увеличена путем изменения как функциональной, так и пространственной компоновки терминалов, а также их погрузочно-разгрузочного оборудования. Однако следует помнить, что такая деятельность влечет за собой дополнительные расходы и влияет на общие затраты эксплуатации терминалов.

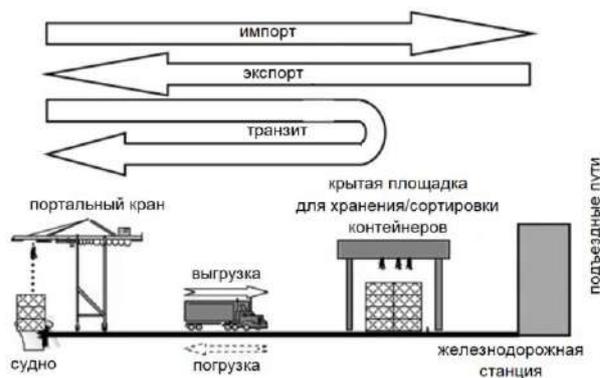
Взаимодействие различных видов транспорта в интермодальных терминалах воспринимается как способ увеличения пропускной

способности терминалов, при этом снижаются эксплуатационные расходы.

При выборе функциональных и пространственных решений интермодального терминала и его оборудования для обслуживания следует учитывать специфику терминала, а также количество и типы ИТЕ, обрабатываемых в единицу времени. В целом функциональные и пространственные решения включают:

- железнодорожно-автомобильную сеть терминала;
- складские и перевалочные площадки для контейнеров, съемных кузовов, полуприцепов, тягачей с полуприцепами;
- стояночные места для грузовых транспортных средств, ожидающих обслуживания;
- фронты погрузки/разгрузки, здания и технические сооружения [11].

Принципиальная схема функционально-пространственного решения интермодального терминала представлена на рис.



Функциональная схема интермодального терминала  
Functional diagram of an intermodal terminal

Эти решения зависят от типа и местоположения интермодального терминала. Наземные, морские и внутренние терминалы имеют разные функциональные и пространственные системы, а также погрузочно-разгрузочное оборудование. Эксплуатационная способность интермодального терминала определяется грузоподъемностью транспортных средств и емкостью хранения ИТЕ [10]. Эффективное обслуживание ИТЕ в терминале обеспечивается системой железных и автомобильных дорог. Отдельные группы путей должны иметь надлежащие соединения, а вся система должна быть спроектирована в соответствии с основными техническими регламентами, строительной до-

кументацией и соответствовать всем условиям для безопасной работы. Связь интермодального терминала с автомобильными дорогами общего пользования обеспечивают подъездные пути, которые позволяют осуществлять маневры автотранспортных средств на терминале в зависимости от технологии их обслуживания.

Складские и погрузочно-разгрузочные площадки выполняют двойную функцию в интермодальном терминале. Они позволяют как хранить, так и сортировать ИТЕ. Данные площадки должны быть спроектированы с учетом технических и технологических решений терминала, а также типа и специфики обслуживаемых грузов. Эффективность площадок достигается размещением в зоне их действия основного погрузочно-разгрузочного оборудования, что позволяет ограничить количество операций до необходимого минимума [11, 15].

### **Методология проектирования интермодального терминала**

Проектирование интермодальных терминалов – это междисциплинарная проблема, охватывающая как технические, так и экономические вопросы. С технологической стороны проектирование позволяет сформировать компоновку терминала, учитывая специфику ИТЕ и процессов их движения по терминально-складской территории [16]. Цель этой части проекта – определить схему интермодального терминала и связи между заданными областями в технологическом аспекте. Объектно-ориентированное проектирование включает определение размеров терминала с точки зрения функциональных и пространственных областей, определенных в процессе технологического проектирования. На этом этапе проектирования рассчитываются параметры, характеризующие планировку (функциональную и пространственную зоны) терминала. Процедура проектирования интермодального терминала осуществляется в четыре этапа [14].

Первый этап включает:

- определение поставщиков и получателей;
- оценка годового и среднесуточного объема грузов, обрабатываемого терминалом, и структуры ИТЕ;
- оценка прогнозов изменения объемов и структуры грузов в аспекте развития интермодальных транспортных систем;

- оценка процентной доли ИТЕ, обрабатываемых на терминале;
- определение среднего времени хранения ИТЕ.

Второй этап включает:

- описание процесса прохождения ИТЕ через терминал;
- определение планировки (функциональной и пространственной зон) предлагаемого терминала;
- выбор способа хранения ИТЕ на терминале;
- определение коэффициента неравномерности поступления ИТЕ.

Третий этап включает:

- определение и расчет времени транспортных циклов для перевозки ИТЕ через терминал;
- расчет суточной трудоемкости прохождения ИТЕ через терминал;
- расчет количества погрузочно-разгрузочного механизмов и человеческих ресурсов, необходимых для обслуживания ИТЕ, с учетом их типа и категории человеческого труда;
- расчет необходимой пропускной способности автомобильного, железнодорожного транспорта, которые используются для ввоза и вывоза ИТЕ;
- определение необходимой вместимости складских площадей;
- расчет параметров компоновки фронтов погрузки-разгрузки и параметров путей сообщения;

- расчет затрат и эксплуатационных расходов планируемого интермодального терминала.

Четвертый этап включает:

- расчет оценочных показателей для индивидуальных проектных решений;
- комплексную оценку проектных решений интермодального терминала.

Перечисленные этапы требуют детального анализа в рамках рационализации технологических процессов и оборудования, а также компоновки, что включают параметризацию входных данных, необходимых для проектирования терминала, и выполнение формальных расчетов отдельных этапов проектирования.

В соответствии с представленной методологией проектирования интермодального терминала и с использованием формализации отдельных этапов проектирования рассмотрен

практический пример проектирования наземного интермодального терминала.

Формулировка логистической задачи.

Исходные данные и условия при проектировании:

1. Терминальное обслуживание транспортных (грузовых) единиц: контейнеры ISO (1A, 1B, 1C), полуприцепы (NS) и съемные кузова (NW).

2. Терминальное обслуживание различных железнодорожных направлений: импорт, экспорт, транзит.

3. Технология обслуживания ИТЕ требует промежуточной обработки (временное хранение) и прямой обработки железнодорожных вагонов и трейлерных вагонов.

4. Среднее количество ИТЕ, обслуживаемых терминалом в день (табл. 2).

5. Перевалка осуществляется на рельсовом портале.

**Таблица 2.** Количество интермодальных транспортных единиц в день, обслуживаемых терминалом

**Table 2.** Number of intermodal transport units per day served by the terminal

№	$n_N$	$n_P$	$n_{P-N}$	$n_{S-S}$	$n_{T-VP}$	$n_{PN}$	$n_{PP}$
1A	25	17	17	12	10	0	8
1B	25	17	15	10	8	0	8
1C	25	17	10	8	3	0	8
NW	5	8	0	0	0	0	0
NS	8	10	0	0	0	0	0

*Примечание.* Количество ИТЕ на железнодорожном транспорте:  $n_N$  (импорт),  $n_P$  (экспорт),  $n_{P-N}$  (транзит). Количество ИТЕ на автомобильном транспорте (транзит)  $n_{S-S}$ . Количество ИТЕ на железнодорожном транспорте без перевалки транзитом  $n_{T-VP}$ . Количество незагруженных ИТЕ на железнодорожном транспорте:  $n_{PN}$  (экспорт),  $n_{PP}$  (импорт).

В интермодальном терминале выполняется максимум три операции по перевалке. Процентное соотношение количества операций для каждого типа ИТЕ, проходящего через терминал, отражено в табл. 3.

**Таблица 3** Процентное соотношение операций по перевалке

**Table 3** Percentage of transshipment operations

№	$n_N$	$n_P$	$n_{P-N}$	$n_{S-S}$	$n_{PN}$	$n_{PP}$
---	-------	-------	-----------	-----------	----------	----------

1	10	10	20	0	10	10
2	80	80	80	100	90	90
3	10	10	0	0	0	0

*Примечание.* Процентное соотношение числа операций, выполненных на определенном виде транспорта  $u(ko^N)$ . Среднее время хранения ИТЕ:  $n_N - 24$  ч;  $n_P - 12$  ч;  $n_{P-N} - 48$  ч;  $n_{S-S} - 24$  ч. Коэффициент неравномерности поступления ИТЕ принимаем равным 1,2.

Определение размеров функциональных и пространственных зон терминала.

Предполагая, что в течение длительного периода времени поток транспортных единиц должен быть сбалансированным, то пропускная способность составит 274 ИТЕ.

С учетом возможности эксплуатации двух железнодорожных линий пропускная способность железнодорожного транспорта составит 137 ИТЕ в каждом направлении. При использовании вагонов вместимостью по три транспортных единицы потребность в вагонах в одном направлении (с учетом коэффициента использования вагонов 0,9) составит 42 вагона для и 5 вагонов для полуприцепов и съемных кузовов.

С учетом длины вагона (14,62 м) протяженность подвижного состава на одном железнодорожном направлении составит 688 м, по два поезда в день для каждого направления длиной 344 м без учета длины локомотива. Тогда предполагается, что длина одного железнодорожного пути на терминале, включая зазор для маневрирования, составит 384 м.

Для транспортных единиц, подвергающихся промежуточной обработке, должна быть предусмотрена площадка для хранения. Принимая во внимание ежедневное количество контейнеров, съемных кузовов и полуприцепов, перемещаемых через терминал, а также предполагаемое время их хранения, вместимость складской площадки должна составлять: 428 мест для контейнеров, 17 – для сменных кузовов, 19 – для полуприцепов.

Если предположить, что контейнеры расположены вдоль погрузочных путей, длина единой площадки для хранения контейнеров не должна превышать 384 м. Следовательно, если предположить, что длина одного ИТЕ составляет 6,5 м, то 59 транспортных единиц может храниться в одном отсеке. Если предположить, что коэффициент штабелирования равен 2, то в одном отсеке можно хранить 118 ИТЕ. Следова-

тельно, для распределения 428 контейнеров на складе с заданным коэффициентом штабелирования потребуется четыре отсека для хранения.

Другой показатель, который необходимо рассчитать, это количество кранов, выполняющих перегрузочные операции. Для этого необходимо подсчитать количество операций ( $N_{ko}$ ). Включая количество контейнеров, съемных кузовов и полуприцепов, которые должны быть обработаны в заданном направлении (некоторые из них обрабатываются по схеме «железнодорожный вагон – автомобиль», часть – «вагон – склад – автомобиль»), необходимое количество операций составит 644 операции. Если предположить, что среднее время цикла работы крана составляет 4 минуты, продолжительность рабочего времени – 16 часов, а коэффициент использования рабочего времени крана равен 0,8, то необходимое количество кранов  $N_M$  определим по формуле:

$$N_M = \frac{N_{ko}}{q_u},$$

где  $q_u$  – суточная производительность кранов (погрузочно-разгрузочных механизмов), определяется отношением:

$$q_u = \frac{T_o \cdot \beta_u}{t_u},$$

где  $T_o$  – суточная продолжительность работы погрузочно-разгрузочных механизмов (принимается равным 2 смены по 8 часов, итого 960 минут);  $\beta_u$  – коэффициент использования рабочего времени крана (0,8);  $t_u$  – среднее время цикла крана – 4 мин. / операция.

Согласно приведенной методике расчета, количество погрузочно-разгрузочных механизмов принимаем равным четырем (стоит учитывать, что при использовании четырех кранов их перегрузочный потенциал не будет полностью использован, а трех кранов будет недостаточно для обслуживания интермодального терминала при более высокой совокупности ИТЕ).

Кроме того, для оценки принятого решения необходимо учитывать затраты на строительство терминала, а также его эксплуатационные расходы [17]. Расходы интермодального терминала включают затраты на содержание железнодорожных путей, погрузочно-разгрузочные механизмы и их техническое обслуживание, системы управления терминалом, а также затраты на оплату труда квалифицированных специалистов.

### Заключение

Проектирование интермодальных терминалов – это многоэтапный процесс, учитывающий ряд технических и технологических требований, вытекающих из нормативных документов. Компонировка терминала и его техническое оснащение определяется спецификой транспортируемых единиц и выполняемых технологических процессов. Следовательно, определение размера, пропускной способности, компоновки терминала (функциональные и пространственные области) и количества погрузочно-разгрузочных механизмов, необходимых для обслуживания определенного грузооборота, требует ряда вычислений. В этом аспекте при проектировании следует учитывать различные решения, что позволит выбрать оптимальное из них для принятых критериев оценки.

Растущая доля интермодальных перевозок в общем количестве перевозимых грузов приводит к тому, что увеличивается загрузка существующих интермодальных терминалов, а это означает, что в ближайшей перспективе будет достигнут предел установленной пропускной способности. Такое явление определяет необходимость в модернизации и строительстве новых терминально-складских комплексов [18, 19]. В статье рассмотрен подход к комплексной методологии проектирования интермодальных терминалов, в которой выделяются области проектирования процессов и объектов.

### Список литературы

1. Казимиров А.О., Михайлов А.Ю. Задачи территориального размещения логистической инфраструктуры в городах // Авиамашиностроение и транспорт Сибири : сб. ст. IX Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2017. С. 351–355.
2. Транспортная инфраструктура как основополагающий фактор эффективного функционирования экономики страны / О.А. Лебедева, Ю.О. Полтавская, З.Н. Гаммаева и др. // Сб. науч. тр. Ангар. гос. техн. ун-та. 2018. Т. 1. № 15. С. 125–130.
3. Куанышева Т.С., Увалиева А.Б. Принципы взаимодействия видов транспорта в условиях рыночных отношений // Транспорт: наука, техника, управление. 2008. № 3. С. 50–51.
4. Шепелев В.Д., Пряхин Д.С., Галигузов А.А. Взаимодействие различных видов транспорта в крупных транспортных узлах // Знание. 2016. № 9-2 (38). С. 5–10.

5. Гозбенко В.Е. Методы прогнозирования и оптимизации транспортной сети с учетом мощности пассажира и грузопотоков / В.Е. Гозбенко и др. // Деп. рукопись № 330-V2008 17.04.2008.
6. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Моделирование грузовых перевозок в транспортной сети // Вестн. Ангар. гос. техн. ун-та. 2016. № 10. С. 182–184.
7. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Развитие городских грузовых систем с учетом концепции городского планирования // Сб. науч. тр. Ангар. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 1. № 1. С. 244–247.
8. Ложкина О.В., Rogozinsky G.G., Крипак М.Н. К вопросу о развитии интеллектуальных систем управления экологической безопасностью транспорта в больших городах-портах // Технологии построения когнитивных транспортных систем : материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. СПб., 2019. С. 153–157.
9. Транспорт в России. 2018 : стат. сб. / Росстат. М., 2018. 101 с.
10. Полтавская Ю.О. Определение очередности обслуживания подвижного состава в транспортных узлах на основе критерия оптимальности // Сб. науч. тр. Ангар. гос. техн. ун-та. 2020. Т. 1. № 17. С. 171–175.
11. Carlo J.H., Vis F.A., Roodbergen K.J., Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme // European Journal of Operational Research. 2014. P. 1–13. DOI:10.1016/j.ejor.2013.11.023
12. Гозбенко В.Е., Крипак М.Н., Иванков А.Н. Совершенствование транспортно-экспедиционного обслуживания грузовладельцев. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2011. 176 с.
13. Крипак М.Н. Оптимизация транспортного обслуживания грузовладельцев в пределах крупного города (городской агломерации) : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Иркут. гос. техн. ун-т. Иркутск, 2009.
14. Pyza D., Jachimowski R. Designing of transshipment terminals in the aspect of selected intermodal transport systems // MATEC Web of Conferences. 2019. P. 1–7. DOI:10.1051/mateconf/201929404006.
15. Burdzik R., Cieśla M., Śladowski A. Cargo Loading and Unloading Efficiency Analysis in Multimodal Transport // Promet – Traffic & Transportation. 2014. Vol. 26. №. 4. P. 323–331. DOI:10.7307/ptt.v26i4.1356
16. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network by using the automation of a Voronoi diagram // Transportation Research Procedia. 2018. C. 427–433. DOI:10.1016/j.trpro.2018.12.118.
17. Sonmez R.; Ontepeli B. Predesign cost estimation of urban railway projects with parametric modelling // Journal of Civil Engineering and Management. 2009. Vol. 15. №. 4. P. 405–409. DOI:10.3846/1392-3730.2009.15.405-409.
18. Poltavskaya Yu.O., Lebedeva O.A., Gozbenko V.E. Automation of the solution to the problem of optimizing traffic in a multimodal logistics system // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. 1258 AISC. P. 255–261. DOI:10.1007/978-3-030-57450-5\_23.
19. Крипак М.Н., Колесник А.И. Проблемы и перспективы развития транспортной инфраструктуры в современных городах // Сб. науч. тр. Ангар. гос. техн. ун-та. 2014. Т. 1. № 1. С. 194–198.

## References

1. Kazimirov A.O., Mikhaylov A.Yu. Zadachi territorial'nogo razmeshcheniya logisticheskoy infrastruktury v gorodakh [Problems of the territorial placement of logistics infrastructure in cities]. *Aviamashinostroyeniye i transport Sibiri. Sbornik statey IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Irkutskiy natsional'nyy issledovatel'skiy tekhnicheskii universitet; Redaktsionnaya kollegiya: Bobarika I.O. (otvetstvennyy redaktor); Lytkina A.A. [Aircraft engineering and transport of Siberia]*, 2017. pp. 351–355.
2. Lebedeva O.A., Poltavskaya Yu.O., Gammayeva Z.N., Kondratenko T.V. Transportnaya infrastruktura kak osnovopolagayushchiy faktor effektivnogo funktsionirovaniya ekonomiki strany [Transport infrastructure as the fundamental factor of effective functioning of the economy of the country]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of the Angarsk State Technical University]*, 2018. Vol. 1. No. 15. pp. 125–130.
3. Kuanysheva T.S., Uvaliyeva A.B. Printsipy vzaimodeystviya vidov transporta v usloviyakh rynochnykh otnosheniy [Principles of interaction of modes of transport in conditions of market relations]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye. Nauchnyy informatsionnyy sbornik [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]*, 2008. No. 3. pp. 50–51.
4. Shepelev V.D., Pryakhin D.S., Galiguzov A.A. Vzaimodeystviye razlichnykh vidov transporta v krupnykh transportnykh uzлах [Interaction of different types of transport in large transport hubs]. *Znaniye [Knowledge]*, 2016. No. 9-2(38). pp. 5–10.
5. Gozbenko V.E., Ivankov A.N., Kolesnik M.N., Pashkova A.S. Metody prognozirovaniya i optimizatsii transportnoy seti s uchetom moshchnosti passazhiro i gruzopotokov [Methods of forecasting and optimizing the transport network taking into account the capacity of passenger and cargo flows]. *Deposited manuscript No. 330-V2008 April 17, 2008.*
6. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Modelirovaniye gruzovykh perevozok v transportnoy seti [Modeling of freight traffic in the transport network]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Angarsk State Technical University]*, 2016. No. 10. pp. 182–184.
7. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Razvitiye gorodskikh gruzovykh sistem s uchetom kontseptsii gorodskogo planirovaniya [Development of urban freight systems with regard to the concept of urban planning]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of the Angarsk State Technical University]*, 2016. Vol. 1. No. 1. pp. 244–247.
8. Lozhkina O.V., Rogozinsky G.G., Kripak M.N. K voprosu o razvitiit intellektual'nykh sistem upravleniya ekologicheskoy bezopasnost'yu transporta v bol'shikh gorodakh-portakh [About development of intelligent systems for control of environmental safety of transport in large port cities]. *Tekhnologii postroyeniya kognitivnykh transportnykh sistem. Materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem [Technologies of construction of cognitive transportation systems. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation]*, 2019. pp. 153–157.
9. *Transport in Russia*. Moscow: Stat sb Rosstat, 2018, 101 p.

10. Poltavskaya Yu.O. Opredeleniye ocherednosti obsluzhivaniya podvizhnogo sostava v transportnykh uzlakh na osnove kriteriya optimal'nosti [Determination of the priority of servicing rolling stock in transport hubs based on the optimality criterion]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Collection of scientific papers of the Angarsk State Technical University], 2020. Vol. 1. No. 17. pp. 171–175.
11. Carlo J.H., Vis F.A., Roodbergen K.J., Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme. *European Journal of Operational Research*, 2014. pp. 1–13.
12. Gozbenko V.E., Kripak M.N., Ivankov A.N. The improvement of transport-forwarding service of cargo owners. Irkutsk, 2011.
13. Kripak M.N. Optimizatsiya transportnogo obsluzhivaniya gruzovladel'tsev v predelakh krupnogo goroda (gorodskoy agglomeratsii): avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Optimization of transport services for cargo owners within a large city (urban agglomeration): author. Ph.D. (Engineering) diss.]. Irkutsk: Irkut. gos. tekhn. un-t, 2009.
14. Pyza D., Jachimowski R. Designing of transshipment terminals in the aspect of selected intermodal transport systems. *MATEC Web of Conferences*, 2019. 294(4):04006, pp. 1–7.
15. Burdzik R., Cieřla M., Sładkowski A. Cargo Loading and Unloading Efficiency Analysis in Multimodal Transport. *Promet - Traffic&Transportation*, Vol. 26, 2014, No. 4, pp. 323–331.
16. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*, 2018. pp. 427–433.
17. Sonmez R., Ontepeli B. Predesign cost estimation of urban railway projects with parametric modelling. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2009. Vol. 15, No. 4. pp. 405–409.
18. Poltavskaya Yu.O., Lebedeva O.A., Gozbenko V.E. Automation of the solution to the problem of optimizing traffic in a multimodal logistics system. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, 1258 AISC, pp. 255–261.
19. Kripak M.N., Kolesnik A.I. Problemy i perspektivy razvitiya transportnoy infrastruktury v sovremennykh gorodakh [Problems and prospects for the development of transport infrastructure in modern cities]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Angarsk State Technical University], 2014. Vol. 1. No. 1. pp. 194–198.

#### Информация об авторах

**Полтавская Юлия Олеговна** – канд. техн. наук, доцент кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: juliapoltavskaya@mail.ru.

#### Information about the authors

**Julia O. Poltavskaya** – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Department of Management of automobile transport, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: juliapoltavskaya@mail.ru.

## Сравнительный анализ потребности проведения ремонта левобережной трамвайной сети города Новосибирска

А. Д. Федосов✉, Е. С. Антерейкин

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

✉ Artemy38@yandex.ru

### Резюме

В статье выполнен сравнительный анализ соответствия нормативного, планируемого и фактически выполненного объемов капитального ремонта трамвайного пути левобережной трамвайной сети г. Новосибирска. Затронуты исторические аспекты появления трамвайных путей в этой части города. С целью исследования указанная сеть разделена на 31 участок с определенными характеристиками. Учитывались основные характеристики участков исследования, такие как тип, род, вид элементов верхнего строения пути, конструкция пути, годы укладки и капитальных ремонтов. Также учитывался продольный профиль, план линии, наличие обособления трамвайного пути от автодороги. В соответствии со статистическими данными по количеству рейсов и объему пассажироперевозок, типу подвижного состава определена средняя грузонапряженность по каждому из участков за последние пять лет. Грузонапряженность рассматривалась для определения нормативной периодичности капитального ремонта. В работе с учетом местных условий установлена продолжительность доремонтных сроков эксплуатации трамвайных участков. Представлены данные по объемам планируемого и фактически выполненного капитального ремонта за период с 2003 г. Установлено, что рекомендуемый нормативный срок проведения капитального ремонта для многих участков истек. Планируемый объем ремонтов менее нормативного за счет различных подходов к назначению ремонтов. При критерии назначения ремонта, определяемом посредством установления фактического состояния пути, объем требуемого ремонта снижается. Это достигается заменой капитальных работ текущими. При этом фактический объем проведенных капитальных ремонтов не соответствует ни нормативному, ни планируемому.

### Ключевые слова

техническое обслуживание, трамвайный путь, верхнее строение пути, капитальный ремонт пути, пассажироперевозки, грузонапряженность участка, периодичность ремонта, срок эксплуатации пути, конструкция пути

### Для цитирования

Федосов А. Д. Сравнительный анализ потребности проведения ремонта левобережной трамвайной сети города Новосибирска / А. Д. Федосов, Е. С. Антерейкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 112–122. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).112-122

### Информация о статье

поступила в редакцию: 10.11.2021, поступила после рецензирования: 17.11.2021, принята к публикации: 29.11.2021

## Comparative demand analysis for repair of the left-bank tram network of the city of Novosibirsk

A. D. Fedosov✉, E. S. Anterejkin

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

✉ Artemy38@yandex.ru

### Abstract

The article provides a comparative analysis of the compliance of the normative, planned and actually completed volumes of overall repair of the tramway track of the left-bank tram network of the city of Novosibirsk. The historical aspects of the appearance of tram lines in this part of the city are touched upon. For the purpose of research, the specified network is divided into 31 sections with certain characteristics. The main characteristics of the sections were taken into account, such as type, class, type of track superstructure elements, track design, years of track laying and overall repairs. The longitudinal profiles, the plan of the line, the presence of separation of the tram track from the road were also taken into account. In accordance with statistical data on the number of routes and the volume of passenger transportation, the type of rolling stock, over the past five years, the average traffic density was determined for each section. Traffic density was taken into account to determine the standard frequency of overall repairs. Taking into account local conditions, the duration of the pre-repair service life of tram sections was established in the work. The data on the volumes of planned and actually completed overall repairs for the period since 2003 are presented. It was found that the recommended standard period for overall repairs for many areas has expired. The planned volume of repairs is less than the standard due to different approaches to the appointment of repairs. With the criterion for the appointment of repairs determined by establishing the actual state of the track, the volume of required repairs is reduced. This is achieved by replacing

overall works with current ones. At the same time, the actual volume of overall repairs carried out does not correspond to either the normative or the planned one.

### Keywords

maintenance, tramway, the upper structure of the track, major repairs of the track, passenger transportation, the length of the site, the frequency of repairs, the service life of the track, the design of the track

### For citation

Fedosov A. D., Anterejkin E. S. Svravnitel'nyj analiz potrebnosti provedeniya remonta levoberezhnoj tramvajnoj seti goroda Novosibirsk [Comparative needs analysis for repair of the left-bank tram network of the city of Novosibirsk]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 112–122. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).112-122

### Article Info

Received: 10.11.2021, Revised: 17.11.2021, Accepted: 29.11.2021

### Введение

Исследование проводилось применительно к левобережной части трамвайной сети Новосибирска из-за ее большой протяженности и высокого пассажирооборота.

Трамвайная система Новосибирска была создана в 1934 г. [1]. Движение в левобережной части открыто 30 апреля 1941 г. и осуществлялось по нынешним ул. Титова, Троллейная, Широкая, Станиславского [2]. Общая протя-

женность трамвайных линий в левобережной части города составляет 83,65 км. Их эксплуатация осуществляется автономно от правобережной части в связи с ликвидацией в начале 1990-х гг. трамвайного движения по Октябрьскому мосту через р. Обь.

На 2020 г. в левобережной части эксплуатировалось восемь трамвайных маршрутов (рис. 1) [3]. Среди распространенного подвижного состава наибольшее распространение



Рис. 1. Схема левобережной сети трамвайного движения г. Новосибирска на 2020 г.

Fig. 1. Scheme of the left-bank tram network in Novosibirsk for 2020

имеют вагоны типа АКСМ-62103 (БКМ-62103) и КТМ-5 (в том числе модернизированные 71-605РМ-11). Общее количество подвижного состава на линиях – 81 ед.

### Характеристика участков исследования

Участок № 1 по ул. Петухова построен в 1971 г., подрельсовое основание – железобетонные шпалы, трамвайный путь на всем участке обособлен от автомобильной дороги, соединяет пос. Чемской с пл. Кирова. Путь на участке № 2 уложен ранее – в 1967 г., при этом в отличие от предыдущего совмещен с автодорогой и на деревянных шпалах, проложен до к. о. п. Молкомбинат. Рельсы по ул. Петухова – типа Р65, участки разделены между собой крупным транспортным кольцом на пл. Кирова.

Улица Сибиряков-Гвардейцев соединяет Кировский и Ленинский районы г. Новосибирска, участки № 3–6 проложены до одноименной площади со стороны пл. Кирова в 1955 г. На данных участках уложены железобетонные и деревянные шпалы. Трамвайный путь на участке № 6, вымощенный дорожной плиткой, один из последних, проходивших капитальный ремонт в 2013 г.

Пути по ул. Мира и Оловозаводская уложены в 1951 г. Это один из самых плохих в плане технического состояния трамвайный участок, соединяет ул. Сибиряков-Гвардейцев и мкр. Бугринская роща. Участок № 9 – наихудший по ул. Мира, на участке уложены деревянные шпалы, местами присутствует асфальт, уложенный поверх шпального основания. Участок № 10, граничащий с предыдущим, прошел капитальный ремонт в 2011 г. и обособлен, здесь также уложены деревянные шпалы. На участке 11 уложены железобетонные шпалы совместно с рельсами Р65. Часть участка заасфальтирована, присутствует интенсивный трафик. Ремонт крайне затруднен.

На ул. Связистов от кривой ул. Невельского до глухого пересечения с ул. Титова уложен трамвайный путь, включающий трамвайные желобчатые рельсы ТВ60 в прямых участках и ТВ65 в кривых, а также железнодорожные рельсы Р65, закрепленные к деревянной шпале костыльным скреплением на щебеночном основании. Со времени укладки (1978 г.) работы по капитальному ремонту трамвайного пути здесь ни разу не проводились. Этот участок подтапливается талыми водами весной и дождевыми в

осенне-летний период, однако системы водоотведения отсутствуют. От глухого пересечения с ул. Титова до узла Юго-Западный ж. м. уложены железнодорожные рельсы Р65 на железобетонных шпалах трамвайного типа. В пределах данного участка находится кривая ул. Оборонная, переукладка которой выполнена в 2010 г. Этот отрезок путей не входит в зону подтопляемых участков, что положительно сказывается на его балльной оценке.

Наилучшее состояние имеет участок о. п. Строительная – кривая ул. Ватутина в виду того, что относительно недавно (2011 г.) на данном участке проводился капитальный ремонт, при этом один из лучших участков находится рядом с самым худшим в соответствии с балльностью левобережного трамвая. Узел ЛТД – о. п. Станиславский ж. м. также имеет «отличную» балльность благодаря проведению капитального ремонта в 2012 г.

### Определение грузонапряженности участков трамвайного пути

Интенсивность использования участков напрямую влияет на срок службы пути и соответственно на срок проведения капитальных ремонтов [4–7]. В исследовании за основу берется средняя грузонапряженность по каждому участку за пять лет.

Расчет грузонапряженности участка трамвайного пути осуществляется по формуле (1):

$$Г = (G + (g \cdot n)) K, \quad (1)$$

где  $G$  – масса вагона (для АКСМ-62103 принимается 17 т [8]);  $g$  – средняя масса пассажира (принимается равной 0,07 т);  $n$  – количество перевезенных пассажиров за раз, чел.;  $K$  – количество рейсов по одному направлению, шт.

В табл. 1 указано количество рейсов и пассажиров, провозимых по участкам, приводятся результаты расчета грузонапряженности.

Участки № 8, 13 являются самыми эксплуатируемыми по числу рейсов – 160,5 тыс. рейсов, так как соединяют крупнейшие узлы (узел Карла Маркса, узел Вертковская) всего левобережья.

Участок № 2 оказался самым малоэксплуатируемым – 20,7 тыс. рейсов, в виду того, что ул. Петухова не является густонаселенной зоной. Здесь преобладают складские здания и предприятия. Улица вынесена в дальний район города.

**Таблица 1.** Количество трамвайных рейсов, пассажиров, расчетная грузонапряженность по участкам за период 2016–2020 гг.**Table 1.** Number of tram runs, passengers, estimated traffic density on sections for the period 2016–2020

№ участка	Границы участка	Количество рейсов, тыс. шт. / количество пассажиров, тыс. чел. / расчетная грузонапряженность по участку, млн т км бр./ (км о.п. год)				
		2016	2017	2018	2019	2020
Ул. Петухова						
1	Пос. Чемской – пл. Кирова	43,1 / 3 748,6 / 0,131	38,5 / 3 467,1 / 0,121	39,3 / 3 546,0 / 0,124	39,9 / 3 616,2 / 0,127	38,8 / 2 878,4 / 0,101
2	Пл. Кирова – к.о.п. Молкомбинат	32,0 / 803,9 / 0,028	21,9 / 497,8 / 0,017	19,5 / 429,2 / 0,015	20,6 / 420,3 / 0,015	20,7 / 294,8 / 0,010
Ул. Сибиряков-Гвардейцев						
3	Пл. Кирова – узел КТД					
4	Узел КТД – «Горбатый» мост	75,1 / 4	60,3 / 3	58,9 / 3	60,5 / 4 036,3	59,5 / 3
5	«Горбатый» мост с подходами	552,6 /	964,9 /	975,2 /	/	173,2 /
6	«Горбатый» мост – пл. Сибиряков-Гвардейцев	0,797	0,652	0,639	0,656	0,617
7	Пл. Сибиряков-Гвардейцев – узел Вертковская	155,7 / 11 177,4 / 1,715	132,6 / 10093,5 / 1,480	131,3 / 10202,3 / 1,473	129,8 / 10145,9 / 1,459	130,3 / 8055,2 / 1,390
8	Узел Вертковская – кривая ул. Покрышкина	135,4 / 9 416,2 / 1,481	151,1 / 10 018,9 / 1,635	154,1 / 10 600,6 / 1,681	158,7 / 10 950,9 / 1,732	160,5 / 8 738,5 / 1,670
Ул. Мира, ул. Оловозаводская						
9	Пл. Сибиряков-Гвардейцев – о.п. Строительная					
10	О.п. Строительная – кривая ул. Ватутина	80,7 / 6 624,9 / 0,917	72,2 / 6 128,6 / 0,829	72,4 / 6 227,1 / 0,833	69,3 / 6 109,6 / 0,803	70,8 / 4 882,0 / 0,772
11	Кривая ул. Ватутина – о.п. Тюменская					
12	О.п. Тюменская – к.о.п. Бугринская роца					
Ул. Покрышкина						
13	Узел Карла Маркса – кривая ул. Покрышкина	135,4 / 9 416,2 / 1,481	150,1 / 10 018,9 / 1,627	154,1 / 10 600,6 / 1,681	158,7 / 10 950,9 / 1,732	160,5 / 8 738,5 / 1,670
Ул. Блюхера						
14	Ул. Титова – кривая ул. Блюхера-Котовского	88,0 / 8531,5 / 1,047	82,3 / 8202,6 / 0,987	82,8 / 8384,7 / 0,998	84,8 / 8605,4 / 1,021	84,0 / 6875,4 / 0,955
Ул. Котовского						
15	Кривая ул. Блюхера – кривая ул. Ватутина	88,0 / 8531,5 / 1,047	82,3 / 8202,6 / 0,987	82,8 / 8384,7 / 0,998	84,8 / 8605,4 / 1,021	84,0 / 6875,4 / 0,955
Ул. Широкая						
16	Ул. Ватутина – узел ТЭЦ-2	88,0 / 8531,5 / 1,047	82,3 / 8202,6 / 0,987	82,8 / 8384,7 / 0,998	84,8 / 8605,4 / 1,021	84,0 / 6875,4 / 0,955
17	Переезд с ул. Станиславского					
18	Узел ТЭЦ-2 – кривая ул. Невельского (от ТЭЦ-2 до кривая Новосибирск-Западный)	127,0 / 9578,3 / 1,415	123,4 / 8947,4 / 1,362	121,7 / 9057,2 / 1,351	121,8 / 9218,8 / 1,358	110,2 / 7323,8 / 1,193

Окончание таблицы 1

19	Узел ТЭЦ-2 – кривая ул. Невельского (от кривой Киевская до кривой ул. Невельского)	78,8/	66,9/	68,2/	64,3/	64,3/
		5590,7/	4860,2/	4934,4/	4736,6/	3763,4/
		0,865	0,738	0,752	0,713	0,679
Ул. Демьяновская						
20	Кривая Новосибирск-Западный – кривая Киевская	78,8/	66,9/	68,2/	64,3/	64,3/
		5590,7/	4860,2/	4934,4/	4736,6/	3763,4/
		0,865	0,738	0,752	0,713	0,679
Ул. Вертковская						
21	Узел Вертковская – узел ЛТД	98,1/	111,5/	113,2/	106,0/	96,2/
		3282,3/	3616,3/	3901,0/	3638,3/	2697,0/
		0,949	1,075	1,099	1,029	0,912
Ул. Троллейная						
22	Узел Новосибирск-Западный – узел Клуб им. Чехова	119,7/	113,3/	111,2/	106,4/	96,9/
		7671,7/	6873,4/	6899,6/	6723,0/	5330,4/
		1,286	1,203	1,187	1,139	1,010
23	Узел Клуб им. Чехова – узел ЛТД	106,6/	129,0/	127,4/	121,7/	115,7/
		7375,1/	7809,0/	8070,7/	7991,5/	6256,6/
		1,164	1,370	1,366	1,314	1,203
24	Узел ЛТД – о.п. Станиславский ж/м	117,0/	98,7/	101,7/	98,5/	96,5/
		7315,0/	6671,4/	6896,2/	6745,6/	5319,4/
25	О.п. ж/м Станиславский – о.п. Автокомбинат	1,251	1,072	1,106	1,073	1,006
Ул. 9-й Гвардейской дивизии						
26	О.п. ул. 9-й Гвардейской дивизии – узел ул. Волховская	117,0/	98,7/	101,7/	98,5/	96,5/
		7315,0/	6671,4/	6896,2/	6745,6/	5319,4/
		1,251	1,072	1,106	1,073	1,006
Ул. Титова						
27	Узел Клуб им. Чехова – узел ул. Связистов	18,06/				
		437,4/	60,5/	61,2/	61,2/	56,1/
28	Узел ул. Связистов – о. п. ул. Бийская	0,169	1520,5/	1790,1/	1902,8/	1579,3/
			0,567	0,583	0,587	0,532
29	О. п. ул. Бийская – о. п. Микрорайон Чистая Слобода	–				
Ул. Связистов						
30	Кривая ул. Невельского – узел ул. Волховская	78,8/	66,9/	68,2/	64,3/	64,3/
		5590,7/	4860,2/	4934,4/	4736,6/	3763,4/
		0,865	0,738	0,753	0,713	0,679
31	Узел ул. Волховская – узел Юго-Западный ж. м	88,0/	82,4/	82,8/	84,8/	84,1/
		8531,5/	8202,6/	8384,7/	8605,4/	6875,4/
		1,047	0,987	0,998	1,022	0,955

В 2020 г. на фоне пандемии коронавируса произошло значимое сокращение пассажироперевозок по всем без исключения участкам. На некоторых из них снижение превысило 200 тыс. чел. (например, участок № 13 – снижение с 10 950,9 тыс. чел. в 2019 г. до 8 738,5 тыс. чел. в 2020 г.). Причем количество выполненных рейсов изменилось незначительно.

Как видно из табл. 1, грузонапряженность по участкам не превышает 2 млн т км бр. / (км о.п. год). Грузонапряженность свыше 1 млн т км бр. / (км о.п. год) на участках № 7, 8, 13, 18, 22–26.

### Определение периодичности капитального ремонта трамвайного пути с учетом его грузонапряженности

В случае определения потребности в проведении ремонтов на железнодорожном пути основной параметр, определяющий необходимость в капитальном ремонте, является срок службы рельсов [9, 10]. В случае трамвайных путей, несмотря на значительно меньшие нагрузки от подвижного состава, этот фактор остается неизменным. Также значительное влияние на увеличение срока службы всего пути оказывает состояние рельсовой колеи. На железнодорожном пути для восстановления рав-

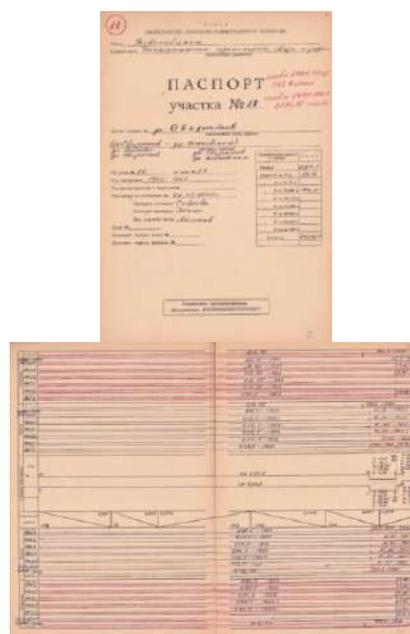
ноупругости подшпального основания проводят планово-предупредительную выправку, назначение которой определяется исходя из количества отступлений по геометрии рельсовой колеи [11, 12]. Такой вид промежуточного ремонта на исследуемом участке трамвайной сети не применяется.

Для определения периодичности проведения капитального ремонта трамвайной сети, воспользуемся табл. 2, полученной по данным из [13].

**Таблица 2.** Нормы периодичности капитальных ремонтов трамвайных путей  
**Table 2.** Rates of frequency of overall repairs of tram tracks

Характеристика конструкции		Грузонапряженность, млн т км бр./ (км о.п. год)
Рельсы и шпалы	Балластный слой	До 2 вкл.
ТВ60, шпалы деревянные	Щебень	19,5
Р50, Р65, шпалы деревянные		20
Р50, Р65, шпалы железобетонные		21

Тип рельсов, род шпал, вид балласта, конструкция пути, определялись по паспорту участка, составленному Службой пути (рис. 2) [14].



**Рис. 2.** Фрагмент паспорта участка № 18  
**Fig. 2.** Fragment of the passport of the section number 18

**Таблица 3.** Верхнее строение и средняя грузонапряженность трамвайного пути на участках  
**Table 3.** Superstructure and average load density of the tram track on the sections

№ участка	Год укладки / капитального ремонта	Тип рельсов	Род шпал	Средняя грузонапряженность, млн т км бр./ (км о.п. год)
1	1971/1993	Р65	Железобетонные	0,121
2	1967/1997		Деревянные	0,017
3	1955/1988	Р65	Железобетонные	0,672
4				
5			Деревянные	
6				
7	1955/2005, 2006		1,640	
8	1995/2005			
9	1951/1975, 1986	Р65	Деревянные	0,831
10	1951/2011			
11.1	1951/1986			
11.2	1951/1998			
12	1951/1977	ТВ60	Деревянные	
13	1955/1983	Р65	Железобетонные	1,638
14	1955/1995	Р65	Железобетонные	1,002
15.1	1972/2008	Р65	Деревянные	1,002
15-2	1972/2007			
16.1	1982/1993	Р65	Железобетонные	1,002
16.2	1972/1993		Деревянные	1,336
17	1972/2003			
18	1941/1972, 1976			
19	1941/1978		Железобетонные	0,749

Окончание таблицы 3

20	1977/1978	ТВ60	Деревянные	0,749
21.1	1973/2008	P65	Деревянные	1,013
21.2	1973/2004		Железобетонные	
21.3	1973/1998		Железобетонные	
22	1941/1993	P65	Железобетонные	1,165
23.1	1941, 1967, 1968/2000	P75	Деревянные	1,283
23.2	1941, 1967, 1968/2002		Железобетонные	
24	1986/2004, 2012	P65	Железобетонные	1,102
25	1986		Железобетонные	
26	1986	P65	Железобетонные	1,102
27	1941, 1968/1997	P65	Железобетонные	0,488
28	1941, 1968/1995		Железобетонные	
29	2017		Деревянные	
30.1	1977, 1978	P65	Железобетонные, Деревянные	0,750
30.2	1977, 1978	ТВ60	Деревянные	
30.3	1977, 1978/2006	P65	Железобетонные	
31	1987		Железобетонные	1,002

В паспорте также указывается год укладки пути, реконструкции или капитального ремонта, план и продольный профиль пути.

В табл. 3 представлены основные данные, полученные при анализе паспортов. Применяются следующие сокращения: P65, P75 – рельсы железнодорожного типа, ТВ60 – желобчатые рельсы трамвайного типа.

Стоит отметить, что щебеночный балласт уложен на территории всего левобережного трамвая. Общий объем деревянных и железобетонных шпал примерно сопоставим (см. рис. 3, а). Деревянные шпалы активно продолжают применяться для укладки при выполнении капитального ремонта и в наше время ввиду их более низкой стоимости и упрощения монтажа. В то же время на грузонапряженных железнодорожных магистралях произошел переход на использование железобетонных шпал ввиду их долговечности и устойчивости.

Практически на всех участках уложен железнодорожный рельс типа P65 (рис. 3, б).

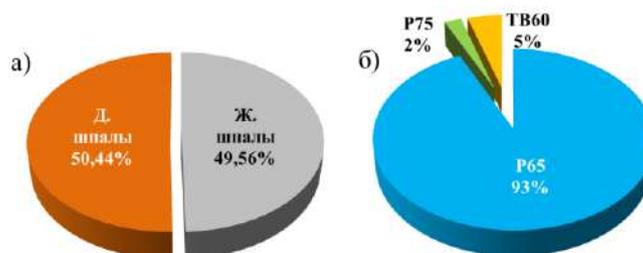
Присутствует незначительное количество рельсов других типов: рельсы P75 на участке № 23, а также рельсы трамвайного профиля ТВ60 – № 12, 20 и 30.

Такие участки выделяются неудовлетворительной балльностью, причиной которой также служат рельсы. Рельс ТВ ввиду своей желобчатой формы имеет узкое соединение между губкой и головкой рельса, которое обламывается, такие рельсы менее долговечные.

Периодичность капитального ремонта также может изменяться в зависимости от местных условий. Их учет производится путем изменения исходной нормы следующим образом:

- у бесстыкового пути увеличение на 20 %;
- для участков с уклонами более 0,035 ‰ уменьшение на 20 %;
- для участков с необособленным дорожным полотном уменьшение на 20 %, на перекрестках – на 30 % [13].

В [15–17] требования периодичности ремонтов трамвайного пути отсутствуют.



**Рис. 3.** Род шпального основания (а) и типы рельсов (б) в левобережной части  
**Fig. 3.** The type of the sleeper base (a) and the types of rails (b) in the left-bank part

В табл. 4 учитывается наличие местных условий, влияющих на периодичность проведения капитального ремонта на каждом из участков, установлена нормативная периодичность.

Из табл. 4 видно, что бесстыковой путь уложен на следующих участках № 8 (2005 г.), 15 (2007 и 2008 г.), 21 (от узла Вертковская до пересечения с ул. Серафимовича) (2008 г.).

Продольный уклон более 0,035 ‰ присутствует лишь на нескольких участках: по ул. Сибириков-Гвардейцев на трех участках: № 15 (от о. п. Зональный институт до кривой ул. Ватутина), 21 (от ул. Станиславского до узла ЛТД) и 22. Данные участки требуют особого внимания в связи со своим повышенным износом.

**Таблица 4.** Местные условия и периодичность капитального ремонта трамвайных путей  
**Table 4.** Local conditions and frequency of overall repair of tram tracks

№ участка	Наличие местных условий			Установленная периодичность проведения капитального ремонта, лет
	Необособленное полотно с дорожным покрытием	Продольный уклон более 0,035 ‰	Бесстыковой путь на всем протяжении участка	
1	–	–	–	21
2	–	–	–	20
3	+	–	–	16,8
4	+	–	–	16,8
5	+	+	–	12
6	+	–	–	16
7	+	+	–	12
8	+	+	+	14
9	+	–	–	16
10	–	–	–	20
11.1	+	–	–	16,8
11.2	–	–	–	21
12	–	–	–	19,5
13	–	–	–	21
14	–	–	–	21
15.1	–	–	+	22
15.2	–	+	+	18
16.1	+	–	–	16,8
16.2	–	–	–	21
17	+	–	–	16
18	–	–	–	20
19	–	–	–	21
20	–	–	–	19,5
21.1	–	–	+	22
21.2	–	–	–	20
21.3	–	+	–	16,8
22	–	+	–	16,8
23.1	–	–	–	20
23.2	–	–	–	21
24	–	–	–	21
25	–	–	–	21
26	–	–	–	21
27	–	–	–	21
28	–	–	–	21
29	–	–	+	24
30	–	–	–	19,5
31	–	–	–	21

Продолжительность эксплуатации сверх установленного нормативного срока отражена на рис. 4.

На участках с наибольшим сверхнормативным сроком эксплуатации – № 12 (24,5 года), 30 (24 года), 20 (23,5 года) – капитальный ремонт должен быть проведен в первую очередь.

Как видно из рис. 5, в Новосибирске капитальный ремонт трамвайных путей в последние 5 лет не проводился (лишь в 2021 г. начат капитальный ремонт участка правобережной сети протяженностью 2,5 км). В первую очередь это обусловлено тем, что накапливающиеся дефекты элементов верхнего строения и отклонения в геометрии колеи устраняются в ходе проведения повышенных объемов текущего ремонта.

Для сравнения на рис. 5 приведена потребность в проведении капитального ремонта по данным Службы пути. Исходя из данных на графике, протяженность участков, требующих ремонта по всей городской сети составляет 52 км. Это значение, судя по всему, будет меньше установленного с помощью норматива, так, как

только по левобережной части сети в данном исследовании участков со сверхнормативным сроком эксплуатации определено в размере 46,74 км. Такая разница, судя по всему, обусловлена различными подходами к определению участков, требующих ремонта. В первом случае потребность, вероятно, определяется исходя из оценки технического состояния пути – балловой оценки по участкам. Балловая оценка улучшается в результате выполнения повышенного объема текущих работ, как уже было сказано [13, 18].

### Заключение

1. Общая протяженность левобережной сети – 83,65 км, за пять лет выполнено 1,08 млн рейсов, перевезено 59,9 млн пассажиров. Наиболее нагруженные участки – узел Вертовская – кривая ул. Покрышкина и узел Карла Маркса – кривая ул. Покрышкина – 160,5 тыс. рейсов эксплуатируемыми. В то же время в 2020 г. произошло резкое снижение пассажироперевозок по всем участкам, на некоторых – до 200 тыс. чел. Средняя грузонапряженность



Рис. 4. Установленная периодичность капитального ремонта, эксплуатация после окончания срока

Fig. 4. The established frequency of overall repair, operation after the end of the period



Рис. 5. Динамика объемов проведения капитального ремонта трамвайных путей в 2003–2020 гг.

Fig. 5. Dynamics of the volume of overall repair of tram tracks in 2003–2020

за пять лет по участкам находится в интервале 0,017–1,749 млн т км бр. / (км о.п. год).

2. В большинстве случаев в путь уложен железнодорожный рельс типа Р65 (93 % от общего объема). Также, применяются рельсы Р75 – 2 % и трамвайные ТВ60 – 5 %. На всем протяжении уложен щебеночный балласт. Объем уложенных деревянных и железобетонных шпал примерно сопоставим (50,44 и 49,56 % соответственно).

3. На многих участках (всего 46,74 км пути) наблюдается сверхнормативный срок эксплуатации пути. На некоторых участках, исхо-

дя из рекомендаций нормативного источника, ремонт надо было проводить 25 лет назад.

4. Если исходить из критерия назначения капитального ремонта по текущему техническому состоянию – балловой оценке, то количество участков, требующих ремонта, становится меньше, но за счет значительно увеличившегося объема текущих работ. Данный подход применяется ввиду недостаточного финансирования капитальных работ и не отменяет, а несколько отодвигает момент выхода из строя значительной части элементов верхнего строения пути, когда капитальный ремонт станет неизбежен.

### Список литературы

1. Золотой век трамвая. Новосибирск : Горэлектротранспорт, 2014. 48 с.
2. Пунцуль И.О., Шахтарина И.А. 70 лет новосибирскому трамваю. Новосибирск : Сета, 2004. 119 с.
3. Новосибирский «Горэлектротранспорт» // ГЭТ : сайт. URL: <http://www.get-nsk.ru/about/> (дата обращения: 26.06.2021).
4. Коссой Ю.М. Рельсовые пути трамваев и внутризаводских дорог. М. : Транспорт, 1987. 296 с.
5. Садиков О.Н. Трамвайные пути. Устройство, ремонт и содержание. М. : Транспорт, 1976. 176 с.
6. Овечников Е.В. Рельсовые пути трамваев и внутризаводских дорог. М. : МХК РСФСР, 1968. 400 с.
7. Науменко В.С. Ремонт и содержание трамвайного пути. М. : Стройиздат, 1964. 191 с.
8. Трамвай модели 62103 // АВТОТЕХКОМ : сайт. Минск : «Штадлер Минск». 2 с. URL: Минск : [http://www.mazbus.ru/pdf/stadler/Tram\\_62103%20rus.pdf](http://www.mazbus.ru/pdf/stadler/Tram_62103%20rus.pdf) (дата обращения: 26.06.2021).
9. Севостьянов А.А., Величко Д.В. Основные причины отказов рельсов в процессе эксплуатации // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 51–54.
10. Величко Д.В., Севостьянов А.А., Антерейкин Е.С. Оценка надежности рельсов на участках Транссибирской магистрали // Вестн. Сиб. гос. ун-та путей сообщ. 2019. № 1 (48). С. 5–11.
11. Севостьянов А.А., Величко Д.В., Рошка В.В. Оценка эксплуатационных показателей работы железнодорожного пути в зависимости от конструкции промежуточных рельсовых креплений // Вестн. Сиб. гос. ун-та путей сообщ. 2019. № 3 (50). С. 23–30.
12. Севостьянов А.А., Величко Д.В. Увеличение срока службы бесстыкового пути на участках с пропуском сверхнормативного тоннажа // Электротехнические комплексы и системы : материалы 54-й Междунар. науч. студ. конф. МНСК-2016. Новосибирск, 2016. С. 34.
13. О проведении планово-предупредительных ремонтов трамвайных путей : положение утв. приказом Министерства жилищно-коммунального хозяйства РСФСР 21.10.1986 г. № 451. М. : Отдел науч.-техн. информ. АКХ, 1986. 26 с.
14. Паспорт участка путей трамвая : разработано производственным объединением «РОСРЕМЭЛЕКТРОТРАНС». Новосибирск: РСФСР Министерство жилищно-коммунального хозяйства.
15. Правила технической эксплуатации трамвая : утв. распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации от 30.11.2001 г. № АН-103-р. М., 2001. 46 с.
16. СП 98.13330.2018. Трамвайные и троллейбусные линии : утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации от 20 ноября 2018 г. № 735/пр. М. : Стандартиформ, 2018. 87 с.
17. СП 84.13330.2018. Трамвайные пути. Актуализированная редакция СНиП Ш-39-76 : утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации от 16 декабря 2016 г. № 958/пр. М. : Стандартиформ, 2016. 36 с.
18. Инструкция по техническому содержанию трамвайных путей : утв. приказом президента концерна «Росгорэлектротранс» Л. А. Пещеровым от 30.12.1992. № 116. М., 1992. 95 с.

### References

1. Zolotoy vek tramvaya [The golden age of the tram]. Novosibirsk: Gorelectrotransport, 2014. 48 p.
2. Punzul I.O., Shachtarina I.A. 70 let novosibirskomy tramvaju [70 years of the Novosibirsk tram]. Novosibirsk: OOO «Kompaniya «Seta» Publ., 2004. 119 p.
3. Novosibirskij «Gore'lektrotransport» [Elektronnyj resurs]. Novosibirsk. URL: <http://www.get-nsk.ru/about/> (Accessed: June 26, 2021).
4. Kossoj Yu.M. Rel'sovy'e puti tramvaev i vntrizavodskix dorog: Uchebnik dlya tekhnikov [Tramways and internal plant tracks]. Moscow: Transport Publ., 1987. 296 p.
5. Sadikov O.N. Tramvajny'e puti. Ustrojstvo, remont i sodержanie [Tram rails. Device, repair and maintenance]. Moscow: Transport Publ., 1976. 176 p.

6. Ovechnikov E.V. Rel'sovy'e puti tramvaev i vnutrizavodskikh dorog [Tramways and internal plant tracks]. Moscow: MXK RSFSR, 1968. 400 p.
7. Naumenko V.S. Remont i sodержanie tramvajnogo puti : uchebnoe posobie [Repair and maintenance of the tram track: a tutorial]. Moscow: Strojizdat Publ., 1964. 191 p.
8. Tramvaj modeli 62103 [Tram models 62103]. Minsk: OAO «Shtadler Minsk». 2 p.
9. Sevost'yanov A.A., Velichko D.V. Osnovny'e prichiny`otkazov rel'sov v processe e`kspluatacii [The main reasons for rail failures during operation]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*. 2017, No. 2 (53), pp. 51–54.
10. Velichko D.V., Sevost'yanov A.A., Anterejkin E.S. Ocenka nadezhnosti rel'sov na uchastkakh Transsibirskoy magistrali [Assessment of the reliability of rails on the sections of the Trans-Siberian Railway]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya [Bulletin of the Siberian Transport University of Railways]*. 2019, No. 1 (48), pp. 5–11.
11. Sevost'yanov A.A., Velichko D.V., Roshka V.V. Ocenka e`kspluacionnykh pokazateley raboty`zheleznodorozhnogo puti v zavisimosti ot konstrukcii promezhutochnykh rel'sovykh skrepleny [Evaluation of the operational performance of the railway track depending on the design of intermediate rail fastenings]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya [Bulletin of the Siberian Transport University of Railways]*. 2019, No. 3 (50), pp. 23–30.
12. Sevost'yanov A.A., Velichko D.V. Uvelichenie sroka sluzhby`bessty`kovogo puti na uchastkakh s propuskom sverxnornativnogo tonnazha [Increasing the service life of a continuous welded track on sections with oversized tonnage passing]. *Materialy`54-j Mezhdunarodnoj nauchnoj studencheskoj konferencii MNSK-2016 «E`lektrotexnicheskie komplekсы`i sistemy» [Materials of the 54th International Scientific Student Conference ISSC-2016 "Electrical Complexes and Systems"]*. Novosibirsk: NGU Publ., 2016. p. 34.
13. Polozhenie «O provedenii planovo-predupreditel'nykh remontov tramvajnykh putej» [Regulations «On scheduled preventive maintenance of tramways»]. Moscow: Department of scientific and technical information AKH, 1986. 26 p.
14. Pasport uchastka putej tramvaya [Passport of the tram track section]. Novosibirsk: RSFSR Ministry of Housing and Communal Services.
15. Pravila texnicheskoy e`kspluatacii tramvaya [Tram technical operation rules]. Moscow, 2001. 46 p.
16. SP 98.13330.2018 Tramvajnie i trollejbusnie linii [SP 98.13330.2018 Tram and trolleybus lines]. Moscow: Standartinform, 2016. 36 p.
17. SP 84.13330.2018 Tramvajnye puti. Aktualizirovannaya redakciya SNiP Sh-39-76 [SP 84.13330.2018 Tram rails. Updated edition of SNiP Sh-39-76:]. Moscow: Standartinform, 2016. 36 p.
18. Instrukciya po texnicheskomu sodержaniyu tramvajnykh putej: utv. prikazom prezidenta koncerna «Rosgorelektrotrans» L. A. Peshherovy`m ot 30.12.1992 g. № 116 [Instructions on the technical maintenance of tram tracks: approved by order of the President of the concern «Rosgorelektrotrans» L.A. Pescherov dated December 30, 1992, No. 116]. Moscow, 1992. 95 p.

#### Информация об авторах

**Федосов Артемий Дмитриевич** – аспирант кафедры пути и путевого хозяйства, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, e-mail: Artemy38@yandex.ru.

**Антерейкин Евгений Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, e-mail: Antereykines@sgups.stu.ru.

#### Information about the authors

**Artemij D. Fedosov** – Post-Graduate Student of Department Path and track facilities, Siberian Transport University, Novosibirsk, e-mail: Artemy38@yandex.ru.

**Evgeniy S. Anterejkin** – Ph.D. in the Engineering Sciences, Associate Professor of the Department Path and track facilities, Siberian Transport University, Novosibirsk, e-mail: Antereykines@sgups.stu.ru.

## Микропроцессорное устройство для непрерывного мониторинга и визуализации температуры окружающего воздуха работниками локомотивных бригад

А. В. Пультяков<sup>1</sup>✉, К. В. Менакер<sup>2</sup>, М. В. Востриков<sup>2</sup>, А. В. Орлов<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация

<sup>3</sup> Российская открытая академия транспорта, г. Москва, Российская Федерация

✉ pulyakov@irgups.ru

### Резюме

В статье рассматривается вопрос разработки локомотивного микропроцессорного устройства непрерывного мониторинга и визуализации температуры окружающего воздуха работниками локомотивных бригад с целью повышения безопасности движения поездов при низких температурах и резко континентальном климате, характерных для Восточного полигона ОАО «Российские железные дороги». Условия вождения и эксплуатации поездов в зимних условиях существенно отличаются от летних. Низкие температуры приводят к снижению подвижности шарниров, возрастает хрупкость металлов и вероятность замерзания трубопроводов, изменяются требования к режимам опробования тормозов и скоростным режимам движения составов. На ряде участков железных дорог, проложенных по искусственным сооружениям, в настоящее время уже действуют скоростные ограничения движения поездов. Рост числа аварийных ситуаций приводит к необходимости введения дополнительных скоростных ограничений на ряде участков со сложным профилем пути. Отсутствие бортовых устройств непрерывного мониторинга и визуализации температуры окружающего воздуха с одновременным контролем скорости движения поезда привело к необходимости поиска технических решений в этом направлении. На основе проведенных исследований и с учетом анализа достоинств и недостатков существующих технических решений авторами предложено микропроцессорное устройство, предназначенное для измерения текущей температуры окружающего воздуха, координаты и скорости движения поезда с возможностью фиксации всех измеренных значений на карту памяти. Проведенные натурные испытания показали высокую эффективность разработанного устройства, а также его надежность и простоту эксплуатации. Актуальность разработки и высокие технические характеристики подтверждены экспертными заключениями и актами внедрения.

### Ключевые слова

мониторинг и визуализация температуры, микропроцессорное устройство, скорость движения поезда, карта памяти, локомотивная бригада, безопасность движения поездов

### Для цитирования

Пультяков А. В. Микропроцессорное устройство для непрерывного мониторинга и визуализации температуры окружающего воздуха работниками локомотивных бригад / А. В. Пультяков, К. В. Менакер, М. В. Востриков, А. В. Орлов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 123–131. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).123-131

### Информация о статье

поступила в редакцию: 12.11.2021, поступила после рецензирования: 19.11.2021, принята к публикации: 25.11.2021

## Microprocessor device for continuous monitoring and visualization of ambient air temperature by locomotive crews workers

A. V. Pulyakov<sup>1</sup>✉, K. V. Menaker<sup>2</sup>, M. V. Vostrikov<sup>2</sup>, A. V. Orlov<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup> Russian Open Academy of Transport, Moscow, the Russian Federation

✉ pulyakov@irgups.ru

### Abstract

The article considers the issue of creating a locomotive microprocessor device for continuous monitoring and visualization of ambient air temperature by members of locomotive crews in order to improve the safety of train traffic at low temperatures and sharply continental climate, typical for the Eastern polygon of JSC «Russian Railways». The conditions of driving and operating trains in winter conditions differ significantly from summer ones. Low temperatures lead to a decrease in the mobility of hinges, the fragility of metals and the likelihood of freezing of pipelines increases, the requirements for brake testing procedures and

speed modes of movement of trains change. Speed restrictions on train traffic are already in effect on a number of sections of railways laid along an artificial structure. The increase in the number of emergency situations leads to the need to introduce additional speed limits on a number of sections with a complex path profile. The absence of on-board devices for continuous monitoring and visualization of ambient air temperature with one-time control of train speed has led to the need to search for technical solutions in this direction. Based on the conducted research and taking into account the analysis of the advantages and disadvantages of existing technical solutions, the authors proposed a microprocessor device designed to measure the current ambient temperature, coordinate and speed of the train with the possibility of recording all measured values on a memory card. The conducted field tests have shown the high efficiency of the developed device, as well as its reliability and ease of operation. The relevance of the development and high technical characteristics are confirmed by expert opinions and implementation acts.

### Keywords

temperature monitoring and visualization, microprocessor device, train speed, memory card, locomotive crew, train safety

### For citation

Pultyakov A. V., Menaker K. V., Vostrikov M. V., Orlov A. V. Mikroprotsessornoe ustrojstvo dlya nepreryvnogo monitoringa i vizualizatsii temperatury okruzhayushhego vozdukhа rabotnikami lokomotivnykh brigad [Microprocessor device for continuous monitoring and visualization of ambient air temperature by locomotive crews workers]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 123–131. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).123-131

### Article info

Received: 12.11.2021, Revised: 19.11.2021, Accepted: 25.11.2021

### Введение

В настоящее время на железнодорожном транспорте действует ряд нормативных актов, регламентирующих порядок подготовки и обслуживания подвижного состава, а также ведения поездов в зимних условиях [1–4].

Низкие температуры приводят к повышению хрупкости всех металлических частей подвижного состава, пути и объектов инфраструктуры; накладывают ограничения на режимы опробования и применения тормозов; регламентируют номенклатуру использования смазочных и охлаждающих жидкостей; ограничивают скоростные режимы движения поездов на отдельных участках.

Рост числа аварийных ситуаций на восточном полигоне Российской Федерации в зимний период времени привел к необходимости пересмотра специалистами АО «Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» в 2019 г. ограничений скоростного режима грузовых составов при низких температурах воздуха на отдельных участках.

На участках, проложенных по искусственным сооружениям – мостам и путепроводам в настоящее время при достижении температуры окружающего воздуха ниже  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  накладываются ограничения по скорости в 60 км/ч. При снижении температуры до  $-40\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже ученые рекомендовали ограничивать скорость движения грузовых поездов до 70 км/ч, а на некоторых участках до 50–60 км/ч [5].

Таким образом, необходимость ограничения скорости поездов в зависимости от температуры окружающего воздуха очевидна. Между тем информирование работников локомотивных бригад о значении температуры в настоящее время осуществляется на железнодорожных станциях в виде численных показаний на стационарных табло, при том что в районах с резко континентальным климатом температура окружающего воздуха может существенно изменяться на длине перегона в несколько десятков километров [6].

### Постановка задачи

Для решения задачи возникает потребность в разработке и внедрении на локомотивах измерительного комплекса с целью непрерывной регистрации температуры окружающего воздуха, текущей координаты и скорости движения поезда с возможностью выдачи предупредительных сигналов при несоответствии параметров и их записи в память устройства для расследования аварийных ситуаций, возникших в случае нарушения режима ведения поездов членами локомотивных бригад.

### Обзор существующих решений

В настоящее время наибольшее распространение находят стационарные измерители температуры окружающего воздуха, которые устанавливаются на железнодорожных станциях в местах остановки локомотивов и информирование работников локомотивных бригад

осуществляется посредством вывода значений температуры на электронное табло.

Проведенный анализ технических решений в области мобильных измерительных комплексов температуры показал, что имеется ряд изобретений однотипной направленности, различного назначения [7–11]. Так, основным назначением бортовой системы регистрации параметров работы локомотива [7] является анализ информации с датчиков температуры и расхода топлива, оборотов турбокомпрессора, мощности и оборотов дизель-генераторного агрегата, температуры охлаждающей жидкости контура охлаждения дизеля с привязкой к пройденному локомотивом пути и скорости движения посредством GSM-модуля. Данная система, несмотря на многофункциональность, предназначена для диагностики состояния технических средств локомотивов и не информирует членов локомотивных бригад о значении температуры окружающего воздуха, не фиксирует измеренные параметры в память устройства.

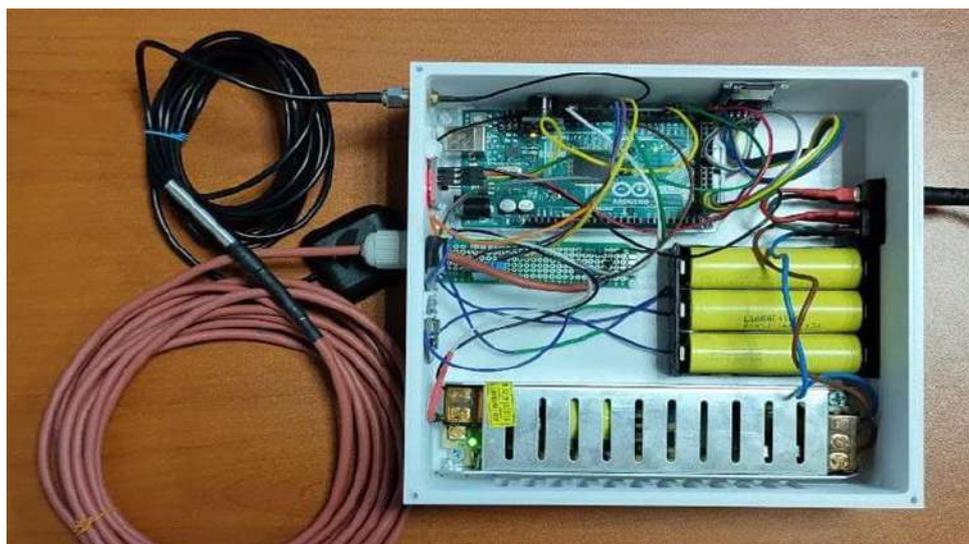
Термометр железнодорожный (рельсовый) ИТ5-П/П-ЖД [8] предназначен для измерения температуры поверхности стальных массивных изделий, в том числе контроля температуры железнодорожных рельсов, букс вагонов, металлических предметов в жилищно-коммунальном и сельском хозяйстве, в машиностроении. Данный прибор не относится к мобильным и не имеет возможности измерения текущей координаты объекта, его скорости пе-

ремещения и фиксации измеренных значений в памяти устройства.

Устройство для измерения температуры наружного воздуха, представленное в работе [9], обеспечивает измерение и фиксацию только одного параметра – температуры без привязки к координате места измерения.

Изобретение [10] относится к средствам управления кондиционированием воздуха в поезде. Устройство осуществляет измерение температуры наружного воздуха и в помещениях вагона, сравнивает эти значения и выдает управляющее воздействие на нагревательные элементы, поддерживая заданный уровень температуры.

Устройство измерения параметров атмосферы, заявленное в работе [11], предназначено для использования в составе гражданских объектов и объектов спецтехники на борту подвижных и неподвижных морских и наземных объектов, для работы в условиях агрессивного воздействия окружающей среды, таких как соляной туман, повышенные или пониженные температура, влажность, давление, солнечное излучение, снег и дождь, иней и роса, пыль и песок. Поставленная задача в устройстве решается благодаря наличию связанных друг с другом датчиков температуры воздуха, относительной влажности воздуха, атмосферного давления, трехкоординатного ультразвукового анемометра, электромагнитного компаса, датчика температуры почвы. Избыточные возмож-



**Рис. 1.** Конструктив микропроцессорного устройства непрерывного мониторинга и визуализации температуры окружающего воздуха

**Fig. 1.** The design of a microprocessor-based device for continuous monitoring and visualization of the ambient temperature

ности прибора приводят к его высокой стоимости и необоснованности применения для решения поставленной задачи.

### **Разработка аппарата микропроцессорного устройства непрерывного мониторинга и визуализации температуры окружающего воздуха**

Конструктив предлагаемого устройства представлен на рис. 1. Устройство выполнено на основе микропроцессорной платформы Arduino Mega 2560 R3 на базе чипа ATmega2560, имеет больше число дискретных портов ввода/вывода и аппаратных serial-портов для взаимодействия с вычислительными средствами более высокого уровня и другими устройствами.

В качестве датчика температуры выбрано оригинальное цифровое устройство DS18B20 производства Maxim Integrated, выполненное по классу защиты IP67 с трехпроводным силиконовым кабелем. Датчик обеспечивает измерение температуры с разрешением от 9 до 12 бит в диапазоне от  $-55$  до  $+125$  °С, с погрешностью  $\pm 0,5$  °С. Датчик помещен в гильзу из нержавеющей стали и залит специальным силиконовым компаундом для защиты от внешних воздействий (встречный поток воздуха, дождь, снег, механические воздействия). Датчик температуры размещается снаружи локомотива на передней фронтальной части обшивки и соединяется с измерительным устройством длинным термостойким кабелем SIHF (FG4OG4)  $3 \times 0,25$  с изоляцией из силиконовой резины. Кабель обладает превосходной электроизоляцией и высокой стойкостью к воздействию озона и кислорода, искусственного освещения, атмосферных осадков, а также сохраняет свои свойства при низких температурах.

Точный отсчет времени в устройстве осуществляется посредством модуля часов реального времени типа DS1307Z. Модуль построен на базе чипа, который снабжен интерфейсом I2C. Модуль позволяет считывать следующие временные интервалы: секунды, минуты, часы, дни недели, месяцы и годы.

Для определения текущей координаты локомотива в составе устройства применен GPS/Glonass приемник с выносной антенной на базе Neoway G7 марки Тройка – GPS/Glonass Extended Receiver V2. Внешняя антенна подключена к модулю трехметровым проводом и

крепится в защитном кожухе рядом с термодатчиком.

Для записи текущих измеренных значений температуры окружающего воздуха, координаты местоположения поезда и скорости его движения в разрабатываемом устройстве применен стандартный модуль-адаптер со слотом MicroSD. Поддерживаемый объем карты памяти 2 Гб обеспечивает запись необходимой информации во временном промежутке до 48 ч.

Для отображения показаний температуры окружающего воздуха устройство оснащено сегментным индикатором TM1637. Все сегменты индикатора являются управляемыми светодиодами для лучшего восприятия численной информации членами локомотивной бригады в условиях ограниченной освещенности кабины машинистов. Индикатор TM-1637 подключается к платформе Arduino и управляется по шине I2C. Панель управления имеет возможность дискретной настройки яркости дисплея, при которой информация с экрана различима даже при сильном дневном свете.

Стабильность и энергонезависимость электропитания обеспечивается от локомотивной электросети с помощью встроенного импульсного источника электропитания и аккумуляторных батарей. Зарядка аккумуляторных батарей осуществляется от зарядного устройства для Li-Ion аккумуляторов HX-3S-FL10A. Данный модуль предназначен для контроля за состоянием аккумуляторов и управления процессом заряда/разряда батарей типа 18650. К контроллеру заряда/разряда HX-3S-FL10A можно подключить одновременно три аккумулятора. Особенности представленного контроллера являются: защита от короткого замыкания и защита от перезаряда. Он имеет функцию отключения подачи питания на аккумуляторы при достижении максимальной емкости даже одной из батарей. Выходное напряжение системы электропитания устройства находится в диапазоне от 11,1–12,6 В.

Следует отметить, что все схемотехнические решения в предлагаемом устройстве выполнены на основе безопасных схем сопряжения [12–14], с учетом повышенной помехозащищенности в условиях сильных электромагнитных помех от электрооборудования электропоездов, контактной сети, высоковольтных линий электроснабжения [15–17], повышенной вибростойкости в условиях работы многочис-

ленного электрооборудования электроподвижного состава и ударных нагрузок, возникающих в ходе движения поезда [18–20].

### Принципиальная схема и алгоритм работы микропроцессорного устройства непрерывного мониторинга и визуализации температуры окружающего воздуха

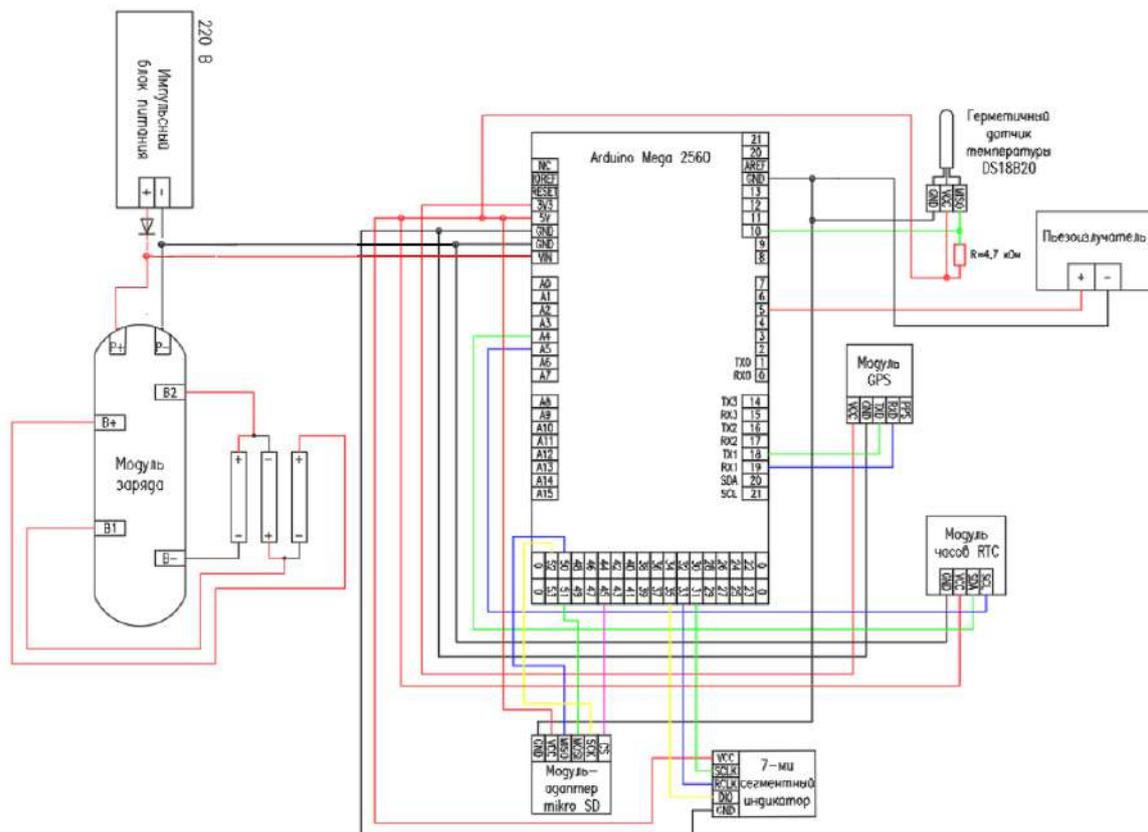
Принципиальная схема и алгоритм работы устройства представлены на рис. 2 и 3.

При включении устройства с помощью тумблера, установленного на верхней панели, производится проверка работоспособности всех модулей. При успешной проверке осуществляется считывание SD-карты и открытие файла для текущей записи информации. Микроконтроллер с заданной периодичностью (1–3 с) считывает информацию с датчиков температуры, местоположения и влажности воздуха. На основе полученных данных и показания модуля часов реального времени программным путем вычисляется текущая скорость движения поезда и производится сравнение с измеренным значе-

нием температуры. При несоответствии скорости движения и температуры окружающего воздуха выдается тройной звуковой и визуальный сигналы для работников локомотивной бригады. Одновременно весь массив измеренной информации, включая сигналы предупреждения, записывается на SD-карту. При неисправности какого-либо модуля в составе устройства осуществляется вывод диагностической информации в виде мигания индикаторных светодиодов на верхней панели прибора с определенной длительностью и периодичностью. При расследовании аварийной ситуации есть возможность изъятия карты памяти из устройства и считывания на персональном компьютере с помощью декодирующей программы.

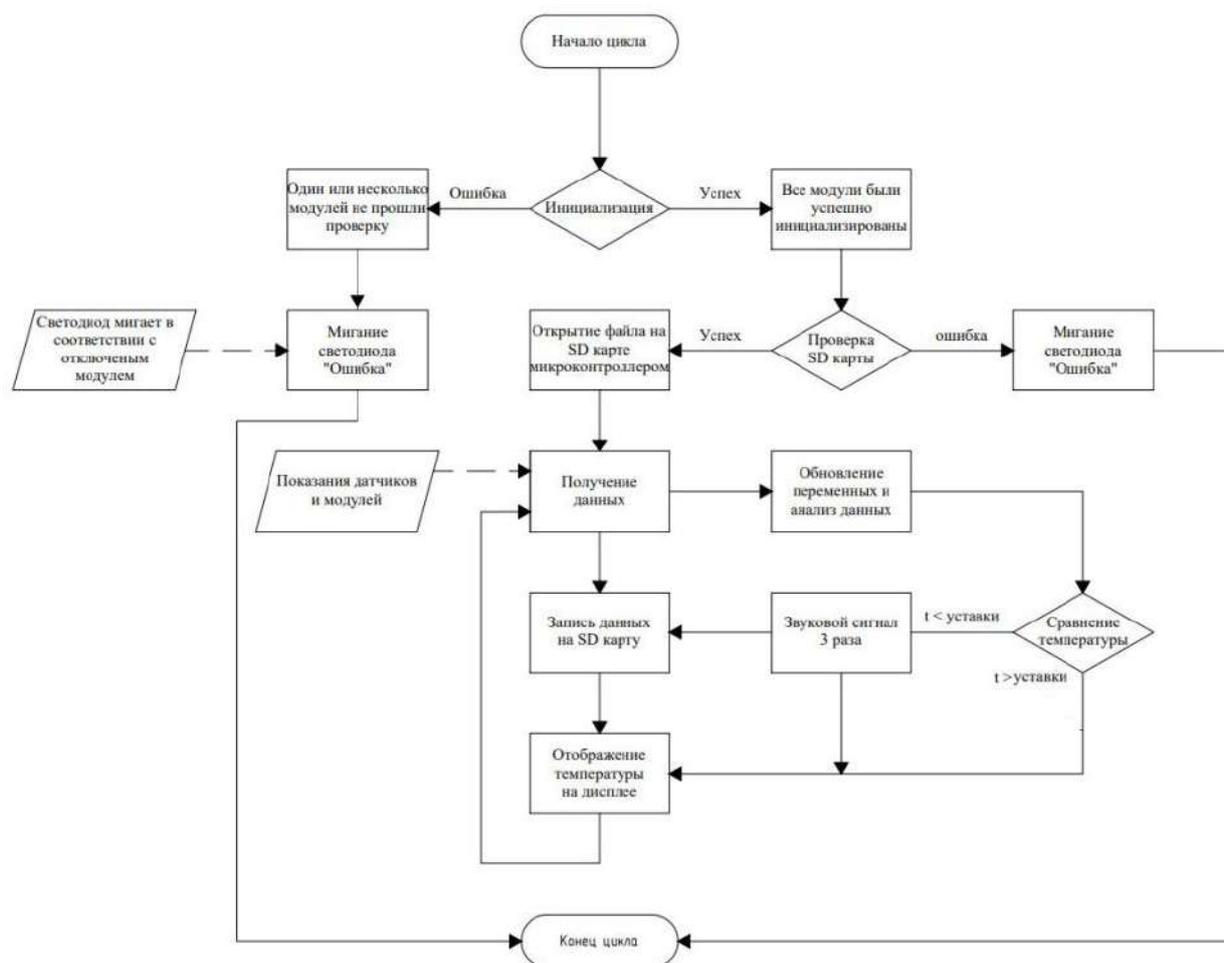
### Разработка и изготовление корпуса микропроцессорного устройства непрерывного мониторинга и визуализации температуры окружающего воздуха

Разработка и изготовление корпуса предлагаемого устройства осуществлены с исполь-



**Рис. 2.** Принципиальная схема локомотивного устройства мониторинга и регистрации температуры окружающего воздуха, координаты и скорости движения поезда

**Fig. 2.** Schematic diagram of a locomotive device for monitoring and recording the ambient temperature, coordinates and speed of the train



**Рис. 3.** Алгоритм работы локомотивного устройства мониторинга и регистрации температуры окружающего воздуха, координаты и скорости движения поезда

**Fig. 3.** Algorithm of operation of a locomotive device for monitoring and recording the ambient temperature, coordinates and speed of the train

зованием технологий 3D-проектирования и печати с предварительным определением числа и размеров компонентов и их удобного функционального размещения. Фрагмент 3D-модели корпуса прибора представлен на рис. 4. Следует отметить, что форма и эргономика корпуса прибора может быть спроектирована с учетом конфигурации приборной панели конкретного локомотива и удобства работы локомотивных бригад.

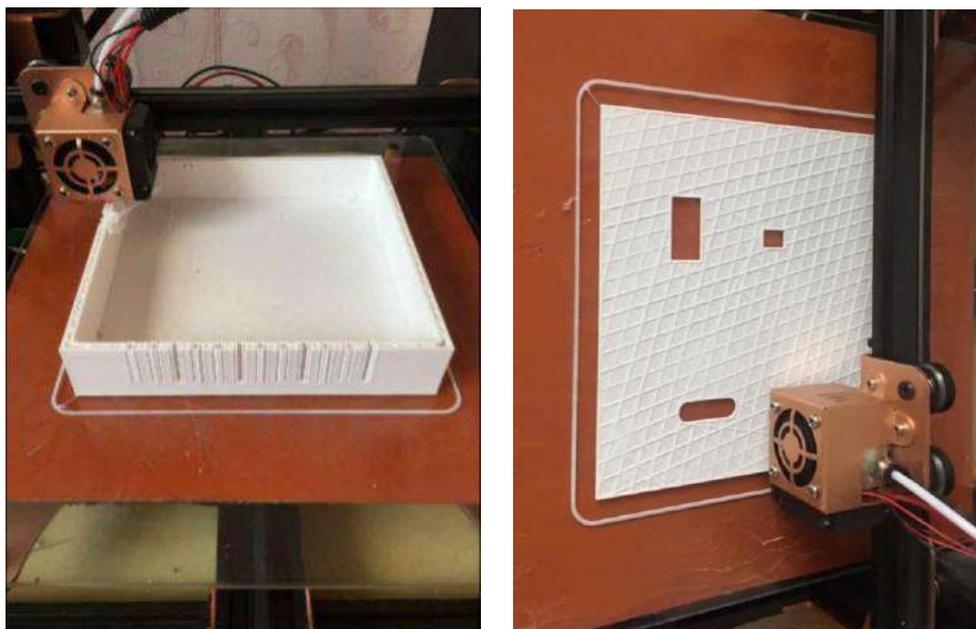
### Опытная апробация устройства мониторинга и регистрации температуры окружающего воздуха, координаты и скорости движения поезда

Апробация разработанного устройства проводилась как в ходе опытных поездок на автотранспортном средстве, так и в условиях,

максимально приближенных к реальным – на электровазе в весенний период времени. Фрагменты результатов испытаний представлены на рис. 5. Испытания проводились с целью определения точности измерения отдельных параметров и оптимальной периодичности измерений. По результатам испытаний были проведены доработки аппаратной и программной части устройства. Время циклического опроса датчиков составило 3 с.

### Заключение

Применение разработанного устройства для мониторинга и регистрации температуры окружающего воздуха, координаты и скорости движения позволяет повысить безопасность движения поездов, культуру работы ло-



**Рис. 4.** Процесс изготовления 3D-модели корпуса для разработанного устройства  
**Fig. 4.** The process of making a 3D-model of the case for the developed device



**Рис. 5.** Маршруты опытной поездки с модулем GPS и с модулем GPS и датчиком температуры соответственно

**Fig. 5.** Experimental routes with GPS module and with GPS module and temperature sensor respectively

комотивных бригад, проводить объективное расследования аварийных ситуаций, произошедших в результате нарушения скоростного режима ведения поездов. Устройство также может использоваться как дублирующее средство локомотивного скоростемера по регистрации

скорости, времени, пройденного расстояния при движении поезда. Установленный на локомотиве опытный образец устройства продолжает проходить эксплуатационные испытания с целью выявления имеющихся недостатков и определения значения наработки на отказ.

#### Список литературы

1. Инструкция по подготовке к работе и техническому обслуживанию электровозов в зимних и летних условиях : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 20.01.2012 № 77р.
2. Технические указания по подготовке, эксплуатации и обслуживанию тепловозов и дизель-поездов в зимних условиях : утв. ЦТ МПС России 30.12.1997 ЦТРТ-14/97).

3. Технические указания по подготовке к работе и техническому обслуживанию электропоездов в зимних условиях : утв. ЦТ МПС России 25.10.1995 N ЦТЭП-21-95.
4. Методические указания по подготовке хозяйства перевозок к работе в зимних условиях : утв. ОАО «РЖД» от 20.12.2006 г.
5. «Дочка» РЖД рекомендует пересмотреть ограничения скоростей грузовых поездов в морозы. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=156058>.
6. Щепотин Г.К. Влияние грузонапряженности и осевых нагрузок на долговечность рельсов в регионах с холодным климатом // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2021. № 1(56). С. 12–19. DOI 10.52170/1815-9262\_2021\_56\_12.
7. Пат. 89834 Рос. Федерация. Бортовая система регистрации параметров работы локомотива / В.М. Бочаров, П.Н. Рубежанский, А.Н. Головаш и др. № 2009133199/22 ; заявл. 03.09.2009 ; опубл. 20.12.2009.
8. Измеритель температуры поверхности цифровой переносной ИТ 5-п/п-ЖД : руководство по эксплуатации РЭ-ЛС.421413.039 РЭ. Новосибирск : РЭЛСИБ. 20 с.
9. Пат. № 2661544 С2 Рос. Федерация. Устройство для измерения температуры наружного воздуха / Р.А. Кантюков, Р.К. Гимранов, А.В. Воронин и др. Российская Федерация. № 2016150282 ; заявл. 20.12.2016 ; опубл. 17.07.2018.
10. Пат. 2680926С1 Рос. Федерация. Железнодорожный поезд и система управления кондиционированием воздуха / Цао Я., Чжао Ц., Ли Ч. и др. № 2018110587 ; заявл. 26.03.2018 ; опубл. 28.02.2019.
11. Тикменов В.Н., Рубичев О.Н., Падерина К.В. Устройство измерения параметров атмосферы: патент на полезную модель № 162914 У1 Российская Федерация, МПК G01W 1/00. № 2016102691/28: заявл. 28.01.2016 ; опубл. 27.06.2016 / заявитель: АО «Научно-технический центр ЭЛИНС».
12. Сенотрусов А.Н., Менакер К.В., Ваулин В.И. Исследование безопасной схемы сопряжения с конденсаторной гальванической развязкой // Образование – наука – производство : материалы III Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2019. С. 226–231.
13. Шульц В.А., Ибрагимов Б.С. Анализ методов построения безопасных микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики // Вестн. Казах. акад. трансп. и коммуникаций им. М. Тоншаева. 2012. № 3(76). С. 39–44.
14. Менакер К.В., Калпин М.Б., Мариненко А.В. Исследование безопасных устройств ввода информации о состоянии релейных датчиков на основе парафазных сигналов // Молодая наука Сибири. 2021. № 1(11). С. 301–307.
15. Безопасность железнодорожного транспорта в условиях Сибири и Севера. / В.А. Акимов и др. М. : Знание, 2014. 856 с.
16. Сисин В.А., Шапран Ф.В. Электромагнитная совместимость электронной и электротехнической аппаратуры локомотивов // Практическая силовая электроника. 2015. № 4. С. 47–51.
17. Куценко С.М. Климов Н.Н., Муратов В.И. Особенности влияния частичных разрядов на безопасность движения поездов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы конф. Иркутск, 2013. Т. 1. С. 53–57.
18. Повышение качества эксплуатации микропроцессорных устройств / М.В. Белькевич, А.В. Пулятьков, В. А. Алексеев и др. // Автоматика, связь, информатика. 2016. № 1. С. 24–27.
19. Shtykin E.S. Study of the operation of high-frequency electrical plants of railway consumers / A.V. Pulyakov et al. // Proceedings of the International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019) : conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 760. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012028.
20. Shamanov V.I., Pulyakov A.V., Trofimov Yu.A. Main electromagnetic jammer sources with impact on the railroad automation systems // Journal of Physics: Conf. Series. 1661 (2020) 012012. DOI:10.1088/1742-6596/1661/1/012012.

## References

1. Instruksiya po podgotovke k rabote i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu ehlektrovozov v zimnikh i letnikh usloviyakh [Instructions for preparation for operation and maintenance of electric locomotives in winter and summer conditions]. Approved by the order of JSC «Russian Railways» dated January 20, 2012. N 77r.
2. Tekhnicheskie ukazaniya po podgotovke, ehkspluatatsii i obsluzhivaniyu teplovozov i dizel'-poezdov v zimnikh usloviyakh [Technical instructions for the preparation, operation and maintenance of diesel locomotives and diesel trains in winter conditions]. Approved by the Central Television of the Ministry of Railways of Russia on December 30, 1997, TSTRT-14/97.
3. Tekhnicheskie ukazaniya po podgotovke k rabote i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu ehlektropoezdov v zimnikh usloviyakh [Technical instructions for preparation for operation and maintenance of electric trains in winter conditions]. Approved by the Central Television of the Ministry of Railways of Russia on October 25, 1995, N TsTEP-21-95.
4. Metodicheskie ukazaniya po podgotovke khozyajstva perevozok k rabote v zimnikh usloviyakh [Guidelines for preparing the transportation system for work in winter conditions]. Approved by JSC «Russian Railways» on December 20, 2006.
5. «Dochka» RZHD rekomenduet peresmotret' ogranicheniya skorostej gruzovykh poezdov v morozy [The «subsidiary» of Russian Railways recommends reviewing the speed limits of freight trains in the cold]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=156058>.
6. Schepotin G.K. Vliyanie gruzonapryazhennosti i osevykh nagruzok na dolgovechnost' rel'sov v regionakh s kholodnym klimatom [Influence of load density and axial loads on the durability of rails in regions with cold climates]. *Vestnik SGUPS [Bulletin of the Siberian State Transport University]*. 2021, No. 1 (56). pp. 12-19. DOI 10.52170 / 1815-9262\_2021\_56\_12.
7. Bocharov V.M., Rubezhanskiy P.N., Golovash A.N., Kostyanov A.A. Patent RU 89834 U1, 09.03.2009.
8. Izmeritel' temperatury poverkhnosti tsifrovoj perenosnoj IT 5-p/p-ZHD. Rukovodstvo po ehkspluatatsii REHLS.421413.039 RE [Digital portable IT 5-p / p-ZhD surface temperature meter. Operation manual RELS.421413.039 RE]. Novosibirsk, RELSIB Publ., 20 p.
9. Kanyukov R.A., Gimranov R.K., Voronin A.V. [etc.]. Patent RU 2661544 C2, 20.12.2016.
10. Cao Ya., Chzhao C., Li Ch. Patent RU 2680926 C1, 26.03.2018.

11. Tikmenov V.N., Rubichev O.N., Paderina K.V. Patent RU 162914 U1, 28.01.2016.
12. Senotrusov A.N., Menaker K.V., Vaulin V.I. Issledovanie bezopasnoj skhemy sopryazheniya s kondensatornoj gal'vanicheskoj razvyazkoj [Investigation of a safe coupling scheme with a capacitor galvanic isolation]. *Materialy III Vse-rossijskoj nauchno-prakticheskoj konferentsii «Obrazovanie – nauka – proizvodstvo»* [Proceeding of the III All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – science – production»]. Chita, 2019, pp. 226–231.
13. Shults V.A., Ibragimov B.S. Analiz metodov postroeniya bezopasnyh mikroprocessornyh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki [Analysis of methods for constructing secure microprocessor systems of railway automation and telemechanics]. *Vestnik Kazahskoj akademii transporta i kommunikatsij im. M. Tynyshpaeva* [Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tonshaev]. 2012, No. 3 (76), pp. 39–44.
14. Menaker K.V., Kalpin M.B., Marinenko A.V. Issledovanie bezopasnyh ustrojstv vvoda informacii o sostoyanii relejnyh datchikov na osnove parafaznyh signalov [Investigation of safe devices for entering information about the status of relay sensors based on paraphase signals]. *Molodaya nauka Sibiri* [Youth Science of Siberia], 2021, No. 1(11), pp. 301–307.
15. Akimov V.A., Alekseenko V.A., Ahmethanov R.S. Bezopasnost' Rossii. Tematicheskij blok «Bezopasnost' zheleznodorozhnogo transporta». V 2 t. T. 2. Bezopasnost' zheleznodorozhnogo transporta v usloviyah Sibiri i Severa [Safety of Russia. Thematic block «Safety of railway transport». In 2 vols. Vol. 2. Safety of railway transport in Siberia and the North]. Moscow: MGOF «Znanie» Publ., 2014. 856 p.
16. Sisin V.A., Shapran F.V. Elektromagnitnaya sovместimost' elektronnoj i elektrotehnicheskoy apparatury lokomotivov [Electromagnetic compatibility of electronic and electrical equipment of locomotives]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical power electronics]. 2015, No. 4, pp. 47–51.
17. Kutsenko S.M., Klimov N.N., Muratov V.I. Osobennosti vliyaniya chastichnyh razryadov na bezopasnost' dvizheniya poezdov [Features of the influence of partial discharges on train safety]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. 2013, vol. 1, pp. 53–57.
18. Bel'kevich M.V., Pul'tyakov A.V., Alekseenko V.A., Lihota R.V. Povyschenie kachestva ekspluatatsii mikroprocessornyh ustrojstv [Improving the quality of operation of microprocessor devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, computer science]. 2016, No. 1, pp. 24–27.
19. Pulyakov A.V., Arsentiev O.V., Kopanov M.V., Alexeenko V.A., Arsentiev G.O., Shtykin E.S. Study of the operation of high-frequency electrical plants of railway consumers. *Proceedings of the International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019) 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 760 (2020). DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012028.
20. Shamanov V.I., Pulyakov A.V., Trofimov Yu.A. Main electro-magnetic jammer sources with impact on the railroad automation systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 1661 (2020) 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012012.

### Информация об авторах

**Пультяков Андрей Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации, телемеханики и связи, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pulyakov@irgups.ru.

**Менакер Константин Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: menkot@mail.ru.

**Востриков Максим Викторович** – старший преподаватель кафедры электроснабжения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: aspirin1979@mail.ru.

**Орлов Александр Валерьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры систем управления транспортной инфраструктурой, Российская открытая академия транспорта РУТ (МИИТ), г. Москва, e-mail: summerman1978@gmail.com.

### Information about the authors

**Andrej V. Pulyakov** – Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor Department of Automation, Remote Control and Communication. Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: pulyakov@irgups.ru.

**Konstantin V. Menaker** – Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: menkot@mail.ru.

**Maxim V. Vostrikov** – Senior Lecturer of the Department of Power Supply, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: aspirin1979@mail.ru.

**Alexander V. Orlov** – Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Infrastructure Management Systems, Russian Open Academy of Transport RUT (MIIT), Moscow, e-mail: summerman1978@gmail.com.

## Проектирование кольцевых пересечений с различными приоритетами направлений движения с учетом распределения транспортных потоков

А. А. Ветрогон✉, М. Н. Крипак, М. В. Дружинина

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Российская Федерация

✉ vetrogon@sevsu.ru

### Резюме

В статье исследуются проблемы и аварийные ситуации на улично-дорожной сети г. Севастополя, причины их возникновения. Проведен анализ дорожно-транспортных происшествий в городе, выявлены пути снижения аварийности. Рассмотрена статистика увеличения личного и общественного транспорта в Севастополе. Было выполнено сравнение простых и кольцевых пересечений, приведены аргументы для выбора приоритетности проезда кольцевых пересечений. Также перечислены виды моделирования, а именно, эмпирический и аналитический, дана их характеристика. Предложены программные продукты для компьютерного моделирования дорожных ситуаций. В связи с исторической застройкой города, изменения транспортной сети в большинстве случаев невозможны, но благодаря моделированию можно провести анализ и предложить вариации изменения движения на загруженном участке дороги. При изменении схем движения на улично-дорожной сети городов важное место отведено кольцевым развязкам различного уровня и вида приоритетного движения. На примере одного из кольцевых пересечений г. Севастополя была собрана и проанализирована информация по автомобильным транспортным потокам. Для оценки транспортной ситуации в имитационной среде моделирования была разработана цифровая модель улично-дорожной сети. Смоделированы варианты организации движения с существующими схемами движения транспорта и при их изменении. Учитывался и дальнейший рост транспортного потока. Результат сравнительных измерений показал, что при организации кольцевого пересечения с приоритетным движением по кольцу, среднее время проезда со стороны ул. Фадеева уменьшается.

### Ключевые слова

транспортные потоки, транспортное моделирование, организация дорожного движения, кольцевые пересечения

### Для цитирования

Ветрогон А. А. Проектирование кольцевых пересечений с различными приоритетами направлений движения с учетом распределения транспортных потоков / А. А. Ветрогон, М. Н. Крипак, М. В. Дружинина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 132–142. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).132-142

### Информация о статье

поступила в редакцию: 18.09.2021, поступила после рецензирования: 07.10.2021, принята к публикации: 13.10.2021

## Designing of turnarounds with different traffic direction priorities taking into account traffic flow distribution

А. А. Vetrogon✉, М. N. Kripak, М. V. Druzhinina

Sevastopol State University, Sevastopol, the Russian Federation

✉ vetrogon@sevsu.ru

### Abstract

The article studies the problems and accidents on the street and road network of Sevastopol, the reasons for their occurrence. The analysis of traffic accidents in the city was carried out, the ways to reduce the number of accidents revealed. The statistics of personal and public transport growth in Sevastopol is considered. Comparison of simple and circle crossroads was carried out, arguments for the choice of priority passage of traffic circles were given. Also types of modeling were considered, namely empirical and analytical, their characteristics are given. Software products for computer modeling of traffic situations is proposed. Due to the complexity associated with the historical development of the city of Sevastopol, changes in the transport network in most cases are not possible, but thanks to the modeling, it is possible to analyze and propose variations of traffic changes on a busy road section. When changing traffic patterns on the street and road network of cities, an important place is given to traffic circles of different level and type of traffic priority. With an example of one of the traffic circles of the city of Sevastopol the collection and analysis of traffic flow information was performed. Traffic flows were measured in this area. To assess the traffic situation in the simulation environment, a digital model of the street and road network was developed. Traffic models with both existing and modified traffic patterns were simulated. Further growth of traffic flow was also taken into account. Comparative measurements showed that on the circle intersection with circle flow priority the mean passing time from Fadeev street is reduced. Application of traffic circles, in comparison with unregulated t- and cross-road intersections, is more relevant in application because they allow to reduce congestion, increase throughput capacity and speed of passage of the road section.

**Keywords**

traffic flow, transportation modeling, traffic management, roundabouts

**For citation**

Vetrogon A. A., Kripak M. N., Druzhinina M. V. Proektirovanie kol'tsevykh peresechenii s razlichnymi prioritetami napravlenii dvizheniya s uchedom raspredeleniya transportnykh potokov [Design of roundabouts with different priorities of traffic directions taking into account distribution of traffic flows]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 132–142. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).132-142

**Article info**

Received: 18.09.2021, Revised: 07.10.2021, Accepted: 13.10.2021

**Введение**

С увеличением количества личного транспорта остро встает проблема пропускной способности автомобильных городских дорог. В городах с исторической застройкой этот вопрос усложняется своим решением. В г. Севастополе достаточно много узловых развязок и есть места, где при реконструкции развязок необходимо применять развязки такого типа, при которых будет максимальная пропускная способность. Темп жизни не прерывно растет, а с ним и необходимость использования личного транспорта. Загруженность дорог и дорожно-транспортные происшествия (ДТП) растут с большой скоростью.

Для того чтобы была возможность отслеживать дорожную обстановку и внедрять новшества, необходимо использовать различного рода моделирования. Департаментом транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры г. Севастополя ведется реализация регионального проекта «Дорожная сеть» и национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» [1]. В планах отремонтировать 15 объектов капитального ремонта и 57 объектов улично дорожной сети. Общая протяженность объектов капитального ремонта и ремонта дорог в 2021 г. составила около 90 км. Благодаря реализации национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» в Севастополе в течение нескольких лет к нормативному состоянию планируется привести более 85 % городских и 50 % пригородных дорог, сократить количество мест концентрации ДТП [2].

При ДТП количество погибших лиц в расчете на 100 тыс. населения («социальный риск») по итогам 2020 г. составляет 5 чел., 2019 г. – 4,1 чел., 2018 г. – 8,2 чел., 2017 г. – 10,9 чел. Приведенные статистические данные свидетельствуют о положительной динамике сокращения количества лиц, погибших в результате ДТП. По ито-

гам 2019 г. Севастополь занял третье место по уровню социального риска, связанного с ДТП, после Чукотского автономного округа и г. Москвы. Специалисты говорят о том, что за три последних года количество автомобилей в Севастополе увеличилось как минимум на 30 %. Сотрудники «НИИПИ градостроительства» предсказывают, что количество частных автомобилей к 2035 г. достигнет 500 автомобилей на 1 000 жителей [3]. Севастополь входит в пятерку регионов с самым высоким уровнем автомобилизации.

Из данных статистики [4] видно, что число личного транспорта (на 1 000 чел. населения) на 2020 г. составляет 269,2 ед. При этом число автобусов общего пользования, находящихся в эксплуатации, на 100 000 чел. населения, на конец 2020 г. составило 165 ед. В 2014 г. число автомобилей составило 89,2, автобусов – 162. Видно, что вырос спрос на личный транспорт. Так как автобусный парк не сокращается, а автомобилей личного использования становится все больше, чаще возникают заторы и ДТП. Следствием этих сложных транспортных проблем является повышения интенсивности движения на улично-дорожной сети (УДС) в условиях города с исторической застройкой [5]. Строительство и модернизация УДС дорогой и трудноизменяемый элемент инфраструктуры города. Наиболее сложное в УДС это – проектирование транспортной планировки города [6]. Изменение УДС начинается с четкой аргументации решений градостроения. Правильная и достоверная оценка УДС ведет к принятию решения по виду градостроительного проектирования, разработке регламента и зонированию городской территории.

Большой уровень автомобилизации несет необходимость изменения УДС, так как при первичной застройке эксплуатируемых дорог не было расчета на нынешнее количество личного и общественного транспорта. При тенден-

ции роста личного транспорта необходимо совершенствовать имеющиеся дорожные развязки и по возможности выбирать такой тип развязок, где пропускная способность и скорость проезда будут максимальными, но при этом безопасными. Так пересечения в одном уровне считаются опасными участками дороги, на которых сосредотачиваются ДТП (18 % всех ДТП в соответствии со статистическими данными). В свою очередь кольцевые развязки автомобильных дорог снижают аварийность, сокращают задержки и увеличивают пропускную способность перекрестка [7]. Также преимуществами кольцевых развязок являются:

- возможность организации движения при пересечении большого количества направлений;
- минимизация числа конфликтных точек;
- более понятная и простая схема проезда пересечения;
- менее затратные в строительстве по сравнению с пересечениями в разных уровнях;
- обеспечение непрерывной пропускной способности транспорта со всех направлений;
- простое регулирование;
- удобство въезда и съезда с кольцевого пересечения [8].

Из зарубежной практики эксплуатации автомобильных дорог видно, что кольцевое движение с приоритетным движением является основным типом кольцевых пересечений. Использование такого типа кольцевых пересечений приводит к повышению уровня безопасности и интенсивной пропускной способности в сравнении с другими типами пересечений в одном уровне [9, 10]. При вводе в эксплуатацию кольцевого пересечения необходимо выбрать правильную организацию движения.

Движение на кольцевых пересечениях организовываются исходя из интенсивности движения на въездах, затраченного времени преодоления кольцевой развязки, а также времени ожидания въезда с неприоритетного направления, вида кольца (круглое, продолговатое и т. д.), интенсивности движения, распределения потоков по направлениям. Существует несколько видов организации движения по кольцевому перекрестку:

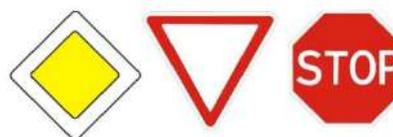
1. Кольцо считается равнозначным, если установлен знак 4.3 (рис. 1) [11], регламентируемый правилами дорожного движения. Согласно этому знаку, водители, находящиеся на

кольце, имеют преимущество, а въезжающие – уступают дорогу.



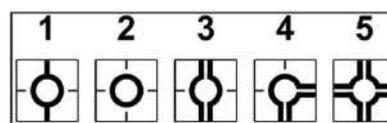
**Рис. 1.** Знак 3.4 «Круговое движение»  
**Fig. 1.** Sign 3.4 “Circular motion”

2. При неравнозначности перекрестка, дополнительно к знаку 3.4 устанавливаются знаки приоритета: 2.1 – «Главная дорога»; 2.4 «Уступи дорогу»; 2.5 «Движение без остановки запрещено» (рис. 2). В дополнение к этим можно установить знак 8.13 «Направление главной дороги» (рис. 3).



**Рис. 2.** Знаки 2.1 «Главная дорога», 2.4 «Уступи дорогу», 2.5 «Движение без остановки запрещено»

**Fig. 2.** Signs 2.1 “Main road”, 2.4 “Give way”, 2.5 “Non-stop traffic is prohibited”



**Рис. 3.** Знак 8.13 «Направление главной дороги»

**Fig. 3.** Sign 8.13 “Direction of the main road”

При такой организации водители, подъезжающие со второстепенной дороги, уступают водителям, находящимся на главной дороге. При пересечении траектории автомобилей, находящихся на главной дороге, уступает водитель, к которому другая машина приближается справа. Одним из вариантов организации коль-

цевого пересечения являются турбо-кольца. Они представляют собой пересечение с несколькими полосами движения, размеченными по спирали [12]. Их применение обусловлено необходимостью исключения дополнительных конфликтных точек при пересечении траектории движения транспортных средств при двухполосной кольцевой проезжей части. Пропускная способность колец такого типа составляет от 3 до 5 тыс. ед./ч. Особенностью таких колец является то, что при приближении к кольцевому перекрестку наносится четкое разделение полос. В пределах узла не допускается перестроение транспортных средств. Применение приоритетного движения на кольцевом перекрестке дает возможность уменьшить граничные интервалы, нежели при предоставлении приоритета вливающемуся на кольцевую проезжую часть потоку. Граничные интервалы в зависимости от приоритета движения на кольцевом пересечении при интенсивности авт./ч 400, 500, 600, 700, 800 соответственно:

- приоритетное движение по кольцевой проезжей части 6,19; 5,95; 5,73; 5,55; 5,48 с.;
- приоритетное движение при въезде на кольцо 6,50; 6,22; 6,00; 5,84; 5,80 с. [13].

Благодаря этому водителям вливающих автомобилей предоставляется наилучший обзор для въезда. Появляется возможность наиболее оперативно и детально дать оценку скорости, траектории передвижения транспорта уже движущегося по приоритету. Водителям, находящимся на въезде на кольцевое пересечение, перед выполнением маневра въезда приходится оценивать характеристики движения транспортного потока автомобилей, движущихся справа.

### **Моделирование движения на кольцевых пересечениях**

Сравнивая крестообразные пересечения и Т-образные примыкания в одном уровне, можно сказать, что кольцевые пересечения более эффективны и имеют меньшее число конфликтных точек. При моделировании движения кольцевых пересечений используют два основных методологических подхода – эмпирический и аналитический.

Эмпирический метод заключается в установлении регрессионных зависимостей по имеющимся экспериментальным данным [14]. Один из таких методов разработан Транспорт-

ной и дорожной исследовательской лабораторией (Transport and Road Reserch Laboratory, TRRL) еще в 70-х гг. прошлого столетия и применяется в Великобритании.

Аналитический метод заключается в установлении вида статистического распределения интервалов между транспортными средствами, применении методов теории вероятностей и теории случайных процессов для определения некоторых показателей эффективности организации движения на кольцевом пересечении. В качестве основных показателей эффективности организации движения на пересечениях в одном уровне компания Highway Capacity Manual (HCM) называет задержки транспортных средств, с учетом которых классифицируется уровень обслуживания (level of service). Для этого использовали теорию массового обслуживания исследователи Поллажек (Pollaczek), Кинчин (Khintchine), Траутбек (Troutbeck), Хейдман (Heidemann) и Вегман (Wegmann) и др. [15, 16].

Программные продукты (Corsim, Integration, Simtraffic, Paramics, Vissim) используются при имитационном моделировании движения транспортных потоков по сети как аналитические модели отдельных изолированных кольцевых пересечений. Благодаря использованию этих программ достигается более точный расчет времени движения по отдельным участкам сети, прогнозируется интенсивность движения, учитывается вероятность образования заторов, длины очередей транспортных средств, а также расчет расхода топлива, эмиссии вредных веществ и уровня шума.

Для более детального моделирование кольцевых пересечений с учетом геометрических параметров возможно использовать программные пакеты Arcady, Rodel, Sidra, Kreisel или GGrabase [17, 18].

### **Результаты моделирования**

Площадь Комбата Неустроева в г. Севастополе, представляющая собой пересечение просп. Героев Сталинграда, просп. Октябрьской революции, ул. Летчиков и ул. Адмирала Фадеева (рис. 4, а) стала объектом исследования.

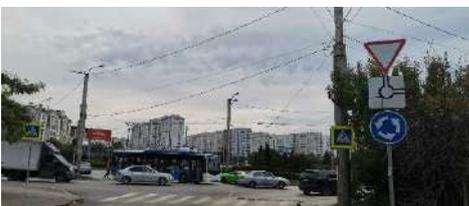
Пересечение имеет четыре входящих потока. Первый поток приходит с просп. Героев Сталинграда, второй с ул. Адмирала Фадеева, третий с просп. Октябрьской революции, четвертый с ул. Летчиков.



**Рис. 4.** Развязка на площади Комбата Неустроева, г. Севастополь:  
*a* – снимок со спутника; *б* – дорожная ситуация  
**Fig. 4.** Interchange at the Kombat Neustroev Square, Sevastopol:  
*a* – satellite image; *b* – traffic situation

Проведя анализ статистики средних скоростей и используя программный сервис Яндекс Пробки, выявлено, что наименьшая скорость движения на участке по ул. Адмирала Фадеева (рис. 1, б). Вероятная причина этого – высокая интенсивность входящих потоков по просп. Октябрьской революции, а кроме того, особенности организации движения на этом участке – для автомобилей, въезжающих на кольцо с просп. Героев Сталинграда и просп. Октябрьской революции установлен приоритет.

Расположение технических средств организации дорожного движения представлено на рис. 5 и 6.



**Рис. 5.** Расположение технических средств организации дорожного движения (въезд со стороны ул. Адмирала Фадеева и ул. Летчиков)  
**Fig. 5.** Location of technical means of traffic management (entrance from Admiral Fadeev Street and Pilots Street)



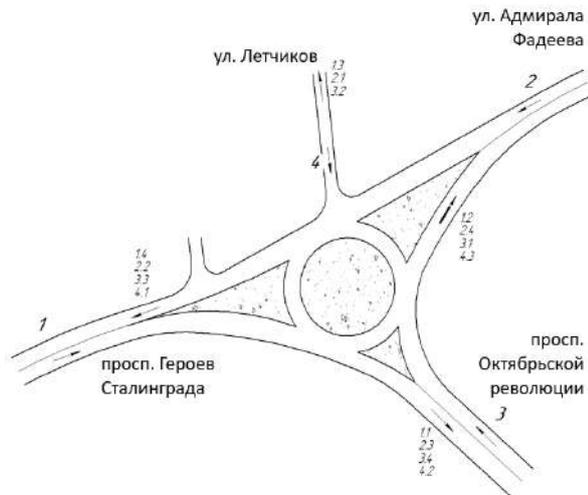
**Рис. 6.** Расположение технических средств организации дорожного движения (въезд со стороны просп. Героев Сталинграда и просп. Октябрьской Революции)  
**Fig. 6.** Location of technical means of traffic management (entrance from Heroes of Stalingrad Avenue and October Revolution Avenue)

В течение семи дней были проведены исследования по часам суток. В результате были определены пиковые часы. Временными интервалами с максимальной интенсивностью движения являются отрезки времени с 8 до 9 утра и с 17 до 19 вечера в будние дни.

Для того чтобы увидеть более полную картину, также были произведены замеры в утреннее, обеденное и вечернее время: 9.00–10.00, 14.00–15.00 и 18.00–19.00. Фиксация производилась с помощью онлайн-камеры, а именно, сервиса Севстар.Дорога (рис. 7). Анализ транспортных потоков проводился в соответствии со схемой потоков (рис. 8).

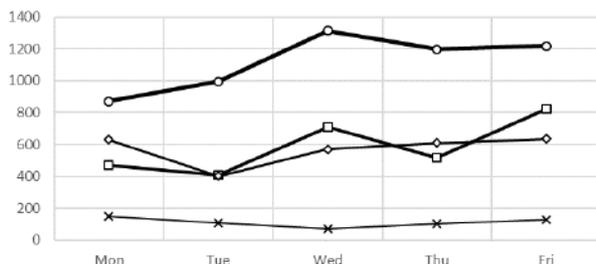


**Рис. 7.** Использование сервиса Севстар (дорога для замера транспортных потоков)  
**Fig. 7.** Using the Sevstar service (road for measuring traffic flows)

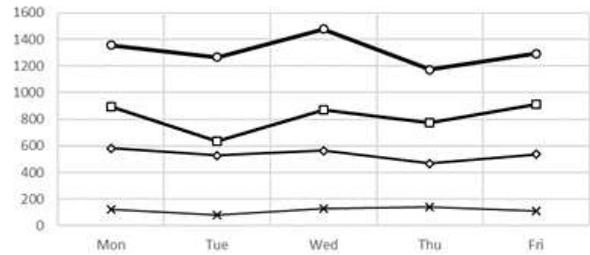


**Рис. 8.** Маршруты движения транспортных средств на площади Комбата Неустроева  
**Fig. 8.** Routes of vehicles on the square of the Battalion Commander Neustroev

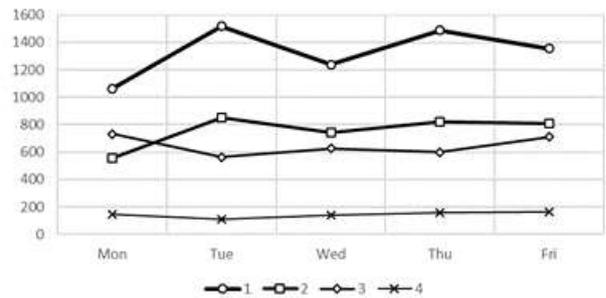
Данные по интенсивности входящих потоков с просп. Героев Сталинграда (направление 1), ул. Адмирала Фадеева (направление 2), с просп. Октябрьской революции (направление 3) и с ул. Летчиков (направление 4) представлены в виде графиков на рис. 9–11.



**Рис. 9.** Результаты замеров интенсивности входящих потоков по рабочим дням недели (утро)  
**Fig. 9.** The results of incoming flow intensity measurements on week days (morning)

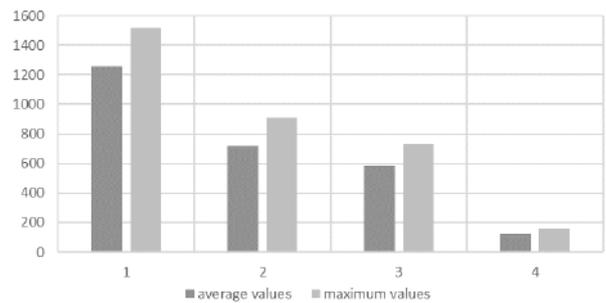


**Рис. 10.** Результаты замеров интенсивности входящих потоков по рабочим дням недели (день)  
**Fig. 10.** The results of incoming flow intensity measurements on week days (noon)



**Рис. 11.** Результаты замеров интенсивности входящих потоков по рабочим дням недели (вечер)  
**Fig. 11.** The results of incoming flow intensity measurements on week days (evening)

Для последующего моделирования были взяты средние и максимальные значения интенсивности входящих потоков транспорта. Данные для каждого направления представлены в виде диаграммы на рис. 12.



**Рис. 12.** Интенсивность входящих потоков по результатам замеров (средняя и максимальная)  
**Fig. 12.** The intensity of incoming flows according to the results of measurements (average and maximum)

Состав транспортного потока (разделение производилось только на легковые, грузовые и автобусы) для каждого направления показаны на рис. 13–16. Для диаграмм были взяты средние значения за все пять рабочих дней недели.

Также по результатам замеров в соответствии со схемами маршрута и распределением потока (см. рис. 8) получен ряд данных (табл. 1).

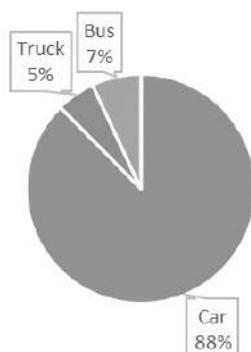


Рис. 13. Средние значения состава входящих потоков № 1

Fig. 13. Mean values of the composition of incoming flows No. 1

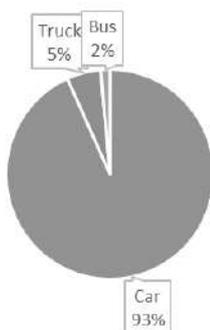


Рис. 14. Средние значения состава входящих потоков № 2

Fig. 14. Mean values of the composition of incoming flows No. 2

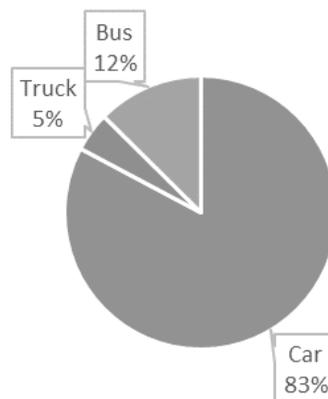


Рис. 15. Средние значения состава входящих потоков № 3

Fig. 15. Mean values of the composition of incoming flows No. 3

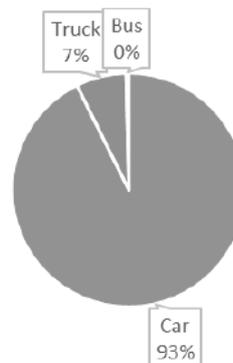


Рис. 16. Средние значения состава входящих потоков № 4

Fig. 16. Mean values of the composition of incoming flows No. 4

Таблица 1. Распределение потока по направлениям

Table 1. Distribution of the flow by directions

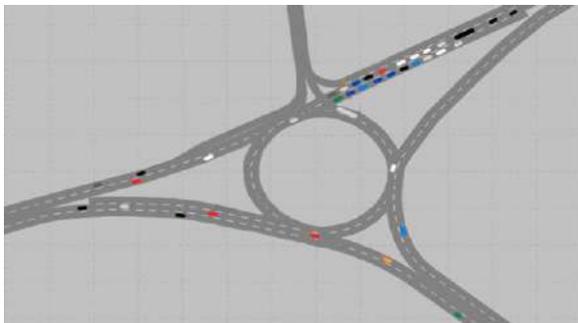
№	Направление	Распределение, средние значения (%)	Интенсивность, средние значения (авт/ч)	Интенсивность, максимальные значения (авт/ч)
	Маршрут			
1	1,1	60	1 255	1 518
	1,2	23		
	1,3	2		
	1,4	15		
2	2,1	5	719	910
	2,2	42		
	2,3	19		
	2,4	33		
3	3,1	80	584	732
	3,2	7		
	3,3	3		
	3,4	10		
4	4,1	65	123	131
	4,2	26		
	4,3	9		

Транспортная ситуация проанализирована в пакете программ PTV Vissim [19]. Также проведено пошаговое построение перекрестка на площади Комбата Неустроева. В первую очередь была спроектирована проезжая часть с учетом ширины и количества полос движения. Были установлены приоритеты проезда транспортных средств в конфликтных зонах.

Затем созданы соответствующие каждому направлению (см. рис. 8) статические маршруты транспортных средств. Распределение входящего потока по статическим маршрутам было задано в соответствии с табл. 2. Также были предусмотрены знаки «Движение без остановки запрещено» со стороны ул. Адмирала Фадеева (рис. 2).

Для замера параметров движения были установлены измерительные счетчики времени в пути на участках дорог, примыкающих к площади. Длины участков, соответствующих счетчикам, приняты одинаковыми и равными 100 м.

Результатом моделирования перекрестка стала имитационная модель перекрестка (рис. 17), дающая возможность оценить, изменения пропускной способности узла и средней скорости транспортных средств при изменении схемы организации дорожного движения.



**Рис. 17.** Результаты моделирования транспортной ситуации при существующей организации дорожного движения

**Fig. 17.** The results of modeling the transport situation under the existing organization of traffic

Далее была произведена оценка сложности перекрестка по числу конфликтных точек. За основу взята методика пятибалльной системы оценки узла, основанная на том, что точка отклонения оценивается одним условным баллом, слияния – тремя и пересечения – пятью баллами. Сложность пересечения определяется как

$$m = N_o + 3N_c + 5N_n,$$

где  $N_o$ ,  $N_c$ ,  $N_n$  – число отклонений, слияний и пересечений соответственно.

Конфликтные точки рассматриваемого перекрестка представлены на рис. 18.

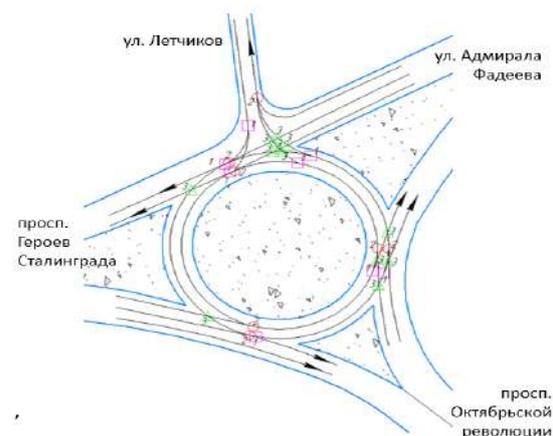
Согласно рис. 10,  $N_o = 7$ ,  $N_c = 7$ ,  $N_n = 12$ . Соответственно показатель  $m$  будет равен 88, т. е. данный перекресток можно отнести к сложным ( $m = 80–150$ ).

Вариантом совершенствования организации движения на перекрестке является:

- организация кругового движения с приоритетным движением по кольцу;
- смена знака «Движение без остановки запрещено» на знак «Уступи дорогу».

Данный показатель у кольцевого пересечения с двухполосным главным кольцом равен 72, т. е. рассматриваемый перекресток при такой организации движения станет перекрестком средней сложности ( $m = 40–80$ ).

Данные изменения отражены на рис. 19.

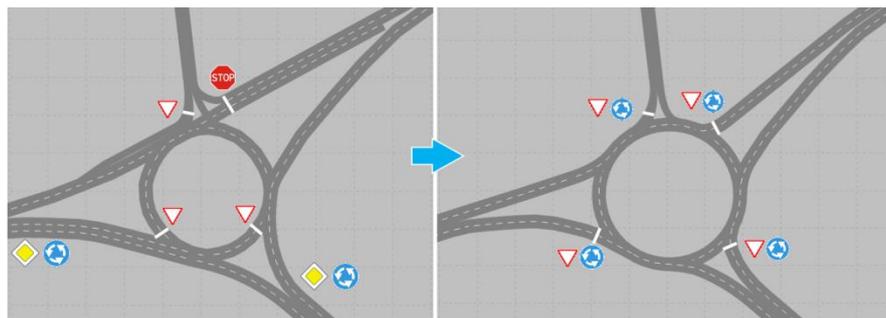


**Рис. 18.** Конфликтные точки на пересечении дорог: 1 – отклонения; 2 – слияния; 3 – пересечения

**Fig. 18.** Conflict points at the road intersection: 1 – deviations; 2 – merges; 3 – intersections

Сравнение существующей и проектной схемы осуществлялось измерением среднего времени в пути на заданных участках. Измерения проведем в три этапа. Первый этап – входящие потоки по результатам замеров (средние значения). Второй и третий этап заключались в том, что интенсивность входящего потока была увеличена на 10 и 20 % соответственно. Это сделано для того, чтобы учесть увеличение интенсивности потока транспорта.

Результаты измерений приведены в табл. 2–3.



**Рис. 19.** Предлагаемые изменения в схеме движения на площади Комбата Неустроева

**Fig. 19.** Proposed changes in the traffic pattern on the square of the Battalion Commander Neustroev

**Таблица 2.** Среднее время проезда перекрестка при исходной схеме организации дорожного движения  
**Table 2.** The mean travel time in the intersection with the original traffic management scheme

Направление	Среднее время в пути, с		
	Исходное значение интенсивности	Увеличение интенсивности на 10 %	Увеличение интенсивности на 20 %
1	62,2	80,04	112,4
2	7,0	7,09	7,1
3	7,0	7,37	8,6
4	6,9	6,96	7,0

**Таблица 3.** Среднее время проезда перекрестка при проектной схеме организации дорожного движения  
**Table 3.** The mean travel time in the intersection With the proposed scheme of the traffic organization

Направление	Среднее время в пути, с		
	Исходное значение интенсивности	Увеличение интенсивности на 10 %	Увеличение интенсивности на 20 %
1	27,9	46,9	65,1
2	10,6	12,1	17,3
3	14,6	23,6	18,4
4	7,0	7,2	7,0

## Заключение

Моделирование организации движения, основанное на достаточном количестве статистических данных о составе и интенсивности транспортных потоков, является важным элементом проектирования современной УДС.

Методы организации приоритетного движения в узлах с круговой системой движения должны выбираться исходя из наличия или отсутствия, а также расположения обособленных полос для движения автобусов и троллейбусов на перегонах до и после узла; геометрических характеристик пересечения; направлений движения транспортных средств общего пользования по территории кольцевого пересечения; наличия или отсутствия в узле светофорной сигнализации; уровня загрузки пересечения движением.

Результаты сравнительных измерений показали, что при организации кольцевого пересечения с приоритетным движением по кольцу, среднее время проезда со стороны ул. Фадеева значительно уменьшается.

## Список литературы

1. Постановление Правительства Севастополя от 17.11.2016 N 1090-ПП (ред. от 16.12.2019) «Об утверждении государственной программы города Севастополя «Развитие транспорта и дорожно-транспортной инфраструктуры города Севастополя».
2. Дауткина А.К., Шелепова А.С. Управление транспортными потоками на улично-дорожной сети города // Молодой ученый. 2018. № 20. С. 144–147. URL: <https://moluch.ru/archive/206/50363>.
3. Автомобилизация Севастополь. URL: <https://110km.ru/art/sevastopol-avtomobilnyu-v-cifrah-i-faktah-122888.html>.
4. Число собственных легковых автомобилей по субъектам Российской Федерации на 1000 человек населения. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455?print=1>.
5. Мартынова Е.С., Гусев С.А. К вопросу об управлении транспортными потоками на улично-дорожной сети города // Техническое регулирование в транспортном строительстве. Саратов: Электронный научный журнал, 2018. С. 1.
6. АСУДД. Методы разгрузки транспортной сети. URL: <https://softline.ru/about/blog/asuddmetodyi-razgruzkitransportnoy-seti>.
7. Клинковштейн Г.И., Афанасьев М.В. Организация дорожного движения. М.: Транспорт, 2001. 247 с.
8. Джавадов А.А. Анализ организации дорожного движения на кольцевом пересечении улиц Рокоссовского, Землячки и Покрышкина / А.А. Джавадов, Ю.Я. Комаров // Молодой ученый. 2016. № 28 (132). С. 70–74. URL: <https://moluch.ru/archive/132/37118/>.
9. Nikitin N., Patskan V., Savina I. Efficiency Analysis of Roundabout with Traffic Signals // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 20. P. 443–449.

10. Методические рекомендации по проектированию кольцевых пересечений при строительстве и реконструкции автомобильных дорог. ОДМ 218.2.071-2016.
11. Дорожные знаки. URL: [https://www.driver-helper.ru/pdd/dorozhnye-znaki/predpisyvayushhie\\_znaki/4.3](https://www.driver-helper.ru/pdd/dorozhnye-znaki/predpisyvayushhie_znaki/4.3).
12. Юсупова Ю.Х. Эволюция проектирования дорожных кольцевых пересечений / Ю.Х. Юсупова // История науки и техники. 2012. № 10. С. 61–66.
13. Обзор различных видов организации дорожного движения на пересечении. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-razlichnyh-vidov-organizatsii-dorozhnogo-dvizheniya-na-peresechenii>.
14. Сильянов В.В., Каюмов Б.К. Методические указания по проектированию кольцевых пересечений автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1980. 69 с.
15. Шевцова А.Г. Медведева М.В. Обзор существующих методов исследования интенсивности движения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 160-летию со дня рождения В.Г. Шухова 2013. С. 1307–1312.
16. Homburger W.S., Hall J.W., William R.R., Edward C.S., Michelle D., Loretta H., John J.L., Matthew R., Vernon H.W. (2007). *Fundamentals of traffic engineering*. University of California, Berkeley, Institute of Transportation Studies.
17. Kesting A., Treiber M., Helbing D. Agents for Traffic Simulation // *Multi-Agent Systems: Simulation and Applications*, Chapter 11, 2008. P. 325–356.
18. Яндекс. Карты, Яндекс. Пробки. URL: [https://yandex.ua/maps/959/sevastopol/?ll=33.451906%2C44.595730&mode=whatshere&utm\\_source=main\\_stripe\\_big&whatshere%5Bpoint%5D=33.451932%2C44.595674&whatshere%5Bzoom%5D=18&z=18](https://yandex.ua/maps/959/sevastopol/?ll=33.451906%2C44.595730&mode=whatshere&utm_source=main_stripe_big&whatshere%5Bpoint%5D=33.451932%2C44.595674&whatshere%5Bzoom%5D=18&z=18).
19. Шагов И.А. Муравьева Н.А. Использование программного комплекса PTV VISSIM для анализа эффективности внедрения кругового движения // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, 2016. Т. 3. С. 336–340.

### References

1. Decree of the Government of Sevastopol dated 17.11.2016 N 1090-PP (as amended on 16.12.2019) “On approval of the state program of the city of Sevastopol “Development of transport and road transport infrastructure of the city of Sevastopol”.
2. Dautkina A.K., Shelepova A.S. Upravlenie transportnymi potokami na ulichno-dorozhnoy seti goroda [Traffic control on the street-road network of the city]. *Molodoi uchenyi [Young scientist]*, 2018, No. 20, pp. 144–147. URL: <https://moluch.ru/archive/206/50363>.
3. Motorization Sevastopol. URL: <https://110km.ru/art/sevastopol-avtomobilniy-v-cifrakh-i-faktakh-122888.html>.
4. Chislo sobstvennykh legkovykh avtomobiley po sub"ektam Rossiiskoy Federatsii na 1000 chelovek naseleniya [The number of own cars in the constituent entities of the Russian Federation per 1000 population]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455?print=1> (access date: Oct 24, 2021).
5. Martynova E.S., Gusev S.A. K voprosu ob upravlenii transportnymi potokami na ulichno-dorozhnoy seti goroda [On the issue of traffic management on the street-road network of the city]. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve [Technical regulation in transport construction]*. Saratov: Electronic research journal Publ., 2018, p. 1.
6. ASUDD. Metody razgruzki transportnoy seti [ATCS. Methods of unloading the transport network]. URL: <https://softline.ru/about/blog/asudd--metodyi-razgruzki-transportnoy-seti>.
7. Klinkovshstein G.I., Afanas'ev M.V. Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya [Organization of traffic]. Moscow: Transport Publ., 2001, 247 p.
8. Dzhavadov A.A., Komarov Yu.Ya. Analysis of the organization of road traffic at the circular intersection of Rokossovsky, Zemlyachka and Pokryshkina streets. *Young scientist*, 2016. No. 28 (132). pp. 70–74. URL: <https://moluch.ru/archive/132/37118/>.
9. Nikitin N., Patskan V., Savina I. Efficiency Analysis of Roundabout with Traffic Signals. *Transportation Research Procedia*, 2017. Vol. 20. pp. 443–449.
10. Methodological recommendations for the design of ring intersections during the construction and reconstruction of roads. ODM 218.2.071-2016.
11. Road signs. URL: [https://www.driver-helper.ru/pdd/dorozhnye-znaki/predpisyvayushhie\\_znaki/4.3](https://www.driver-helper.ru/pdd/dorozhnye-znaki/predpisyvayushhie_znaki/4.3).
12. Yusupova Yu.Kh. Evolyutsiya proektirovaniya dorozhnykh kol'tsevykh peresecheniy [Evolution of the design of road roundabouts]. *Istoriya nauki i tekhniki [History of science and technology]*, 2012, No. 10, pp. 61–66.
13. Overview of various types of traffic management at the intersection. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-razlichnyh-vidov-organizatsii-dorozhnogo-dvizheniya-na-peresechenii>.
14. Silyanov B.V., Kayumov B.K. Methodological guidelines for the design of traffic circles of highways. Moscow: Transport, 1980. 69 с.
15. Shevtsova A.G., Medvedeva M.V. Obzor sushchestvuyushchikh metodov issledovaniya intensivnosti dvizheniya [A review of existing methods for studying the intensity of traffic]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova, posvyashchennoi 160-letiyu so dnya rozhdeniya V.G. Shukhova [Materials of the International scientific and technical conference of young scientists Shukhov BSTU, dedicated to the 160th anniversary of the birth of V.G. Shukhov]*, 2013, pp. 1307–1312.
16. Homburger W.S., Hall J.W., William R.R., Edward C.S., Michelle D., Loretta H., John J.L., Matthew R., Vernon H.W. (2007). *Fundamentals of traffic engineering*. University of California, Berkeley, Institute of Transportation Studies.
17. Kesting A., Treiber M., Helbing D. Agents for Traffic Simulation. *Multi-Agent Systems: Simulation and Applications*, Chapter 11, 2008. pp. 325–356.

18. Yandex. Karty, Yandex. Probki [Yandex.Maps, Yandex.Tailbacks]. URL: [https://yandex.ua/maps/959/sevastopol/?ll=33.451906%2C44.595730&mode=whatshere&utm\\_source=main\\_stripe\\_big&whatshere%5Bpoint%5D=33.451932%2C44.595674&whatshere%5Bzoom%5D=18&z=18](https://yandex.ua/maps/959/sevastopol/?ll=33.451906%2C44.595730&mode=whatshere&utm_source=main_stripe_big&whatshere%5Bpoint%5D=33.451932%2C44.595674&whatshere%5Bzoom%5D=18&z=18) 7819.

19. Shatov I.A., Murav'eva N.A. Ispol'zovanie programmnoy kompleksa PTV VISSIM dlya analiza effektivnosti vnedreniya krugovogo dvizheniya [Using the PTV VISSIM software package to analyze the implementation of circular motion]. *Alternativnye istochniki energii v transportno-tekhnologicheskom komplekse: problemy i perspektivy ratsional'nogo ispol'zovaniya* [Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use]. Voronezh: G.F. Morozov Voronezh State Forestry Technical University Publ., 2016, Vol. 3, pp. 336–340.

#### Информация об авторах

**Ветрогон Александр Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, e-mail: vetrogon@sevsu.ru.

**Крипак Марина Николаевна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, e-mail: marikol@yandex.ru.

**Дружинина Мария Валерьевна** – магистрант кафедры автомобильного транспорта, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, e-mail: druzininamasha97@gmail.com.

#### Information about the authors

**Alexander A. Vetrogon** – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Associate Professor, the Sub department of Automobile transport, Sevastopol State University, Sevastopol, e-mail: vetrogon@sevsu.ru.

**Marina N. Kripak** – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Associate Professor, the Sub department of Automobile transport, Sevastopol State University, Sevastopol, e-mail: marikol@yandex.ru.

**Maria V. Druzhinina** – Graduate Student the Sub department of Automobile transport, Sevastopol State University, Sevastopol, e-mail: druzininamasha97@gmail.com.

## Анализ качества электрической энергии в питающей сети 220 кВ с присоединенными тяговыми подстанциями

С. И. Макашева✉

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

✉ smakasheva@gmail.com

### Резюме

Статья посвящена актуальной проблеме оценки качества электрической энергии в системе электроснабжения общего назначения при наличии среди подключенных потребителей несимметричных и несинусоидальных нагрузок предприятий промышленности и железнодорожного транспорта. Выполнен аналитический обзор текущего положения дел в области правового регулирования степени ответственности за вклад в ухудшение качества электрической энергии и экономического стимулирования участников электроснабжения для улучшения качества электрической энергии. Производится анализ отечественных и зарубежных исследований в области выявления источников искажения, определения и оценки вклада участников электроснабжения в ухудшение показателей качества электрической энергии. Рассмотрены функциональные возможности автоматической системы мониторинга параметров электрической энергии, установленной в контрольных точках участка магистральной электрической сети, расположенного на Дальнем Востоке России. На основе ее базы данных проведены расчет и анализ показателей качества электрической энергии в контрольных точках систем, дана оценка степени их соответствия существующим нормативным документам. Результаты проведенного вероятностно-статистического анализа показателей качества электрической энергии позволяют заключить, что на рассматриваемом участке 220 кВ трехфазной сети общего назначения существенные искажения синусоидальности кривых напряжения вызываются нагрузками присоединенных тяговых подстанций. Кроме того, неудовлетворительная ситуация зафиксирована с положительным отклонением напряжения. Против ожидания симметрия напряжений в трехфазной системе в контрольных точках оказалась удовлетворительной. Подчеркивается важность разработки методик и способов выявления источников искажения и оценки вклада участников электроснабжения в ухудшение качества электрической энергии. Отмечается необходимость расширения функциональных возможностей существующей системы автоматического мониторинга в части анализа степени соответствия показателей качества нормам действующего государственного стандарта.

### Ключевые слова

система электроснабжения, качество электрической энергии, несимметрия напряжений, искажение синусоидальности, отклонение напряжения

### Для цитирования

Макашева С. И. Анализ качества электрической энергии в питающей сети 220 кВ с присоединенными тяговыми подстанциями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 143–151. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).143-151

### Информация о статье

поступила в редакцию: 21.09.2021, поступила после рецензирования: 09.10.2021, принята к публикации: 16.10.2021

## Power quality analysis in the 220 kV supply network with connected traction substations

S. I. Makasheva✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ smakasheva@gmail.com

### Abstract

The paper deals with the actual problem of assessing the power quality in a public power supply systems where asymmetric and non-sinusoidal loads of industrial enterprises and railway transport are connected. The current state of art in the field of legal regulation and economic stimulation of electricity supply participants in the field of power quality improving is analyzed. Analysis of domestic and foreign studies is carried out in the field of identifying sources of distortion, determining and evaluating the contribution of power supply participants to the power quality deterioration. The functional capabilities of the electricity parameters automatic monitoring system installed at the control points of the power network section located on the Far East of Russia were analyzed. Based on its databases, the calculation and analysis of power quality indicators at the mentioned control points were carried out. The degree of their compliance with existing regulatory documents was estimated. The results of the power quality indicators probabilistic and statistical analysis suggest that in the 220 kV section of the three-phase network under con-

sideration, voltage sinusoidity is significantly distorted resulting from connected traction substations' loads. In addition, an unsatisfactory situation is recorded with a positive voltage deviation. Against expectation, the symmetry of voltages in a three-phase system at control points turned out to be satisfactory. The importance of developing methods and ways for identifying distortion sources and assessing their contribution to the power quality deterioration is emphasized. Necessity of expanding the existing automatic monitoring system functionality in terms of assessing the degree of conformity of power quality indicators with the norms of the current State standard is recognized.

### Keywords

power supply system, power quality, voltage unbalance, sinusoidal distortion, voltage deviation

### For citation

Makasheva S. I. Analiz kachestva elektricheskoy energii v pitayushchej seti 220 kV s prisoedinyonnymi tyagovymi podstanciyami [Power quality analysis in the 220 kV supply network with connected traction substations]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 143–151. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).143-151

### Article info

Received: 21.09.2021, Revised: 09.10.2021, Accepted: 16.10.2021

### Введение

Электрическая энергия в современном, динамично развивающемся мире является необходимым ресурсом для функционирования всех без исключения сфер деятельности человека, поэтому ее высокое качество нужно всем участникам электроэнергетического обмена на этапах производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии.

Качество электрической энергии (КЭ) есть совокупность показателей качества электрической энергии (ПКЭ), изменение значений которых допускается в строго определенном диапазоне за конкретный временной интервал [1–4]. Если ПКЭ выходит за допустимые значения [2] или за установленные временные рамки, то качество электроэнергии считается неудовлетворительным. Электрическая энергия неудовлетворительного (низкого) качества вызывает ряд неблагоприятных последствий, начиная со снижения эффективности работы и срока службы электрооборудования, увеличения потерь в элементах системы электроснабжения и т. п., заканчивая ростом риска возникновения аварий и отказов элементов и системы в целом [1, 2–7]. Для нашей страны ущерб для экономики от низкого КЭ оценивается в 25 млрд долл. в год, при этом отмечается, что работы по повышению КЭ идут крайне медленно [8].

Проблемы с КЭ в равной степени затрагивают как потребителей, так и поставщиков электрической энергии, а также все звенья ее передачи и распределения. Поэтому присутствует необходимость решения ряда сложно разрешаемых вопросов между субъектами про-

цесса электроснабжения в разрезе проблемы ухудшения КЭ:

1. Доказательство участия субъекта (установление «виновника» ухудшения КЭ).
2. Определение степени (доли) вклада субъекта в искажение по конкретным ПКЭ.
3. Экономическое и правовое урегулирование возникающих споров, в том числе в области ответственности за изменение КЭ.
4. Разработка и применение мер, направленных на улучшение КЭ.

Одним из наиболее сложных является комплекс вопросов, касающихся доказательства участия субъекта в процессе ухудшения КЭ, определения доли его участия в этом ухудшении и применение экономических мер воздействия в отношении «виновника» вносимых искажений. Особенно сложно проводить подобные исследования в электрических сетях, к которым подключаются различные по мощности, характеру нагрузки и отраслевой принадлежности объекты.

### Актуальность проблемы и постановка цели и задач

Несмотря на очевидный факт необходимости поддержания КЭ на высоком уровне, качество электрической энергии в системах электроснабжения за последние 10 лет значительно ухудшилось, что отмечают исследователи проблемы КЭ по всему миру [6–12]. Это вызвано не только расширением многообразия нелинейных и несинусоидальных нагрузок, подключаемых к системам электроснабжения, но множеством других факторов [1, 3, 6, 8–10]. Как результат, в реальных условиях эксплуата-

ции измеряемые значения ПКЭ могут значительно отличаться от тех значений, которые приведены в учебной и справочной литературе. Поэтому все большее значение приобретают результаты натуральных измерений на действующих объектах и их анализ.

В нашем случае, объектами исследования являются контрольные точки магистральной электрической сети на шинах 220 кВ трансформаторных подстанций, к которым подключаются отпаечные воздушные линии для присоединения объектов электроснабжения железнодорожного транспорта. Предметами исследования являются ПКЭ, рассчитанные на основе натуральных измерений характеристик электрической энергии. Цель работы – определение степени соответствия ПКЭ нормам действующего стандарта [2].

Для достижения поставленной цели выполнен вероятностно-статистический анализ ПКЭ на основании баз данных натуральных измерений автоматической системы мониторинга (АСМ) за 90 суток. АСМ установлена в точках магистральной электрической сети на участке транзита электрической энергии, расположенном на Дальнем Востоке РФ.

### **Анализ правовых и экономических аспектов стимулирования повышения качества электрической энергии**

В Российской Федерации, несмотря на более чем 20-летний период, прошедший с окончания крупных реформ в энергетической отрасли, нормативно-правовая база по вопросам КЭ все еще не сформирована в полной мере и находится в стадии приведения ряда документов к требованиям международных стандартов [3, 8, 11, 13, 14]. Анализ арбитражной судебной практики показывает, что с 2000 г. к компаниям, осуществляющим энергосбытовую деятельность, применяются правовые методы воздействия за поставку электроэнергии низкого качества в соответствии со ст. 542 Гражданского кодекса РФ [3, 8, 11, 13, 14, 16]. Причем, ГК РФ фактически возлагает ответственность за низкое КЭ на энергоснабжающую организацию, хотя общеизвестно, что основная причина снижения КЭ по ряду ПКЭ (к примеру, коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения) находится на стороне потребителя [1, 3–5].

Кроме того, современные формулировки действующих в РФ нормативных документов в

части КЭ носят во многом декларативный характер и обязывают поставщиков электрической энергии обеспечивать КЭ в одностороннем порядке, что не только несправедливо по отношению к ним, но и на практике не способствует обеспечению КЭ [3]. Анализ арбитражной практики показывает, что заявления истца (энергоснабжающей организации или потребителя электроэнергии) к ответчику о принудительном включении в текст договора на электроснабжение требований по КЭ с оговоренными размерами экономических санкций, против которых возражает другая сторона, в удовлетворении заявляемого требования о возмещении ущерба (любой из сторон) судами любой инстанции практически всегда отклоняются [16].

Ранее существовавшая в нашей стране система скидок и надбавок за КЭ к тарифу за потребленную электрическую энергию была примером экономического стимулирования участников энергетического рынка. Однако, несмотря на долгое время своего применения и достаточно хорошую структуру, система была отменена Приказом Минэнерго РФ от 28 декабря 2000 г. № 167, а взамен нее не было введено в обращение никакого другого нормативно-правового документа. Правовое регулирование КЭ в российской электроэнергетике за 20 лет не показало своей эффективности ввиду отсутствия стимулирующих мер (специальных тарифов за поддержание высокого КЭ, штрафных санкций за неудовлетворительное КЭ и т. п.), а также наличия нечетких формулировок и «пробелов» в действующих нормативных правовых документах [3, 15–17]. Кроме того, в настоящее время в России отсутствуют нормативные правовые документы, четко регламентирующие вопросы определения степени участия и доли ответственности субъекта электроэнергетического рынка за внесенные искажения в ухудшение КЭ.

В мировой и отечественной научной практике исследования в области выявления источников искажения и оценки вклада участников электроснабжения ведутся достаточно интенсивно [10, 12, 18–22], однако наиболее сложным вопросом в правовом аспекте является вопрос доказательств и обоснования степени участия субъекта в процессе ухудшения КЭ.

В настоящее время мировым трендом во всех отраслях жизнедеятельности становится цифровизация процессов управления КЭ с ис-

пользованием интеллектуальных систем мониторинга параметров электроэнергии, что является актуальным направлением и для российской энергетики [3, 6, 7, 23]. Использование АСМ для непрерывного мониторинга КЭ позволяет на основании анализа большого объема накопленных данных решать такие технически сложные вопросы, как установления факта искажения КЭ, сбора доказательств по факту выявленных нарушений КЭ и определения степени ответственности стороны, виновной в искажении КЭ [3].

### Применяемые методы исследования и структура используемой системы мониторинга

В РФ лидером по внедрению систем мониторинга и управления качеством электроэнергии (СМиУКЭ) является Федеральная сетевая компания ПАО «ФСК ЕЭС», которая в 2016–2025 гг. реализует пилотный проект системы управления КЭ на основе непрерывного мониторинга.

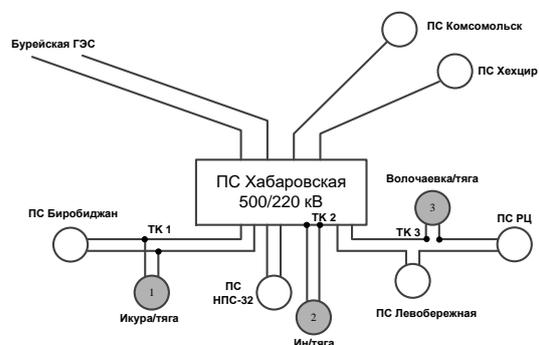
Проект охватывает четыре предприятия межрегиональной электрической сети Востока (МЭС Востока), которые расположены в Хабаровском, Забайкальском и Красноярском краях, а также на территории Амурской области. Состав потребителей, присоединенных к электрической сети, также различен: Дальневосточная железная дорога – филиал ОАО «РЖД» (присоединенные тяговые подстанции переменного тока) и ряд промышленных предприятий – ООО «Горно-обогатительный комбинат», ООО «Транснефть Дальний Восток», ОАО «Цементный завод», ООО «Бруситовый рудник».

Указанные потребители являются характерными видами нелинейных, несимметричных и резкопеременных нагрузок, искажающих КЭ при присоединении к питающим электрическим сетям [22–26].

Схема внешнего электроснабжения участка с указанием электросетевых объектов приведена на рис. 1.

Подстанция (ПС) Хабаровская 500/220 кВ является крупным сетевым объектом, обеспечивающим переток мощности от генерирующих источников, расположенных в близлежащих энергосистемах. На ПС Хабаровская имеется два открытых распределительных устройства 220 и 500 кВ. Шины 500 кВ связывают две соседние энергосистемы по двум воздушным

линиям (ВЛ) 500 кВ. Через шины 220 кВ по ВЛ 220 кВ передается мощность на ПС 4 с отпайкой на ПС Икура/тяга, ПС нефтеперерабатывающей станции НПС–32, тяговую ПС Ин/тяга по двум цепям высоковольтных линий электропередачи (см. рис. 1).



**Рис. 1.** Структурная схема внешнего электроснабжения рассматриваемого участка  
**Fig.1.** External power supply scheme of the considered power supply system section

Точки контроля КЭ, о которых далее пойдет речь, находятся на ВЛ 220 кВ, питающих одноименные присоединения к тяговым подстанциям, обозначенным на рис. 1 как ТК1, ТК2 и ТК3.

Рассматриваемый участок энергосистемы не имеет собственных генерирующих источников электрической энергии, в связи с чем потребность в мощности и электрической энергии всех потребителей покрывается за счет электростанций, расположенных в соседних субъектах РФ.

На уровне подстанции в выбранных контрольных точках производится измерение ПКЭ при помощи приборов класса А: Ресурс–UF2–4–30 и МИП–02А–43.01. На этом уровне поступающая информация в виде распределенной функции измерений доступна для обработки, отображения, хранения и передачи информации. Для того чтобы измеренные характеристики послужили основанием для возможных исковых требований в судебные органы (к примеру, для возмещения материального ущерба из-за несоответствия КЭ нормам ГОСТа), замеры, должны быть произведены в порядке, регламентированном ГОСТ 30804.4.30–2013. Замеры ПКЭ в СМиУКЭ формируются в виде базы данных таблиц, а информация, представленная в ней, легко поддается обработке стандартными утилитами Microsoft

Excel, что позволяет хранить ее удаленно на сервере, анализировать, делать прогнозы ПКЭ и т. д.

Общеизвестно, что параметры электрической сети (в том числе и ПКЭ) можно представить в виде случайных величин, измерения и обработку которых принято производить при помощи вероятностно-статистических методов [3].

Для практических расчетов принимается, что распределение энергетических характеристик электрической сети подчиняется распределению Гаусса (нормальный закон распределения):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}},$$

где  $x$  – рассматриваемая случайная величина,  $\mu_x$  – математическое ожидание (МО) случайной величины  $x$ ;  $\sigma_x$  – среднеквадратическое отклонение (СКО).

Рассматриваемая СМиУКЭ фиксирует значения ПКЭ в текущий момент времени, но не сравнивает их с допустимыми значениями ПКЭ и не выводит заключение о соответствии (или не соответствии) КЭ нормам [2]. Этот вид расчетов нам необходимо было провести для контрольных точек. Для этого по каждому исследуемому ПКЭ для каждой контрольной точки были рассчитаны параметры нормального закона распределения для исследуемых ПКЭ и определены прогнозные диапазоны их изменения.

### Полученные результаты и их обсуждение

В результате расчета и анализа значений коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности  $K_{2U}$  в точках контроля, откуда получают питание тяговые подстанции (Икура/тяга, Ин/тяга, Волочаевка/тяга на рис. 1.), превышений требований ГОСТ 32144-2013 не было выявлено. Такая ситуация является скорее исключением из правил, так как однофазные нагрузки электроподвижного состава железных дорог, неравномерно загружающие трехфазную питающую систему, яв-

ляются источниками несимметрии напряжений. В нашем случае удовлетворительное КЭ по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности  $K_{2U}$  можно объяснить нетипичной схемой подключения тяговых подстанций к системе внешнего электроснабжения и близостью мощного питающего центра – ПС Хабаровска 500/220 кВ.

В результате анализа положительного отклонения напряжения  $\delta U_{(+)}$  на ПС Хабаровская по всем фазам выявлено превышение норм, установленных ГОСТ 32144–2013 [2]. Результаты расчета по каждой из трех рассматриваемых точек присоединения тяговых подстанций приведены в табл. 1. Жирным шрифтом в таблице выделены значения, которые выходят за нормируемые пределы [2].

КЭ по величине положительного отклонения напряжения во всех трех точках контроля является неудовлетворительным.

Анализ искажения синусоидальности кривых напряжения по отдельным гармоническим составляющим  $K_{U(n)}$  показал, что для ТК1 имеются превышения требований [2] для следующих высших гармонических составляющих (ВГС) напряжений:

- по фазе А превышены нормально допустимые значения по 9 ВГС, предельно допустимые значения превышены по 5 и 9 ВГС;
- по фазе В превышены нормально допустимые значения по ВГС с порядковыми номерами 3 и 9, предельно допустимые – 5 и 9 ВГС;
- по фазе С превышены нормально допустимые значения для 9 ВГС, предельно допустимые значения превышены по ВГС с номерами 5 и 9.

Таким образом, КЭ по коэффициенту  $K_{U(n)}$  в исследуемой точке ТК1 не соответствует требованиям ГОСТ 32144-2013 по всем трем исследуемым фазам.

Опуская результаты анализа для ТК2 ввиду их схожести с результатами для ТК1 по количеству и распределению по фазам, перей-

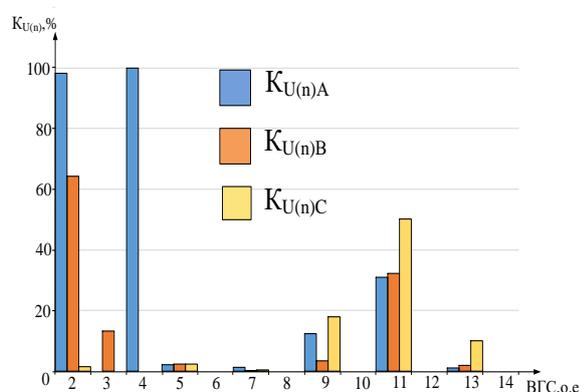
**Табл. 1.** Положительное отклонение напряжения  $\delta U_{(+)}$

**Table 1.** Positive voltage deviation  $\delta U_{(+)}$

Точки контроля	$\delta U_{вс (+)}$		$\delta U_{сa (+)}$		$\delta U_{aв (+)}$	
	Процент выхода	Соответствие ГОСТ 32144-2013 (да/нет)	Процент выхода	Соответствие ГОСТ 32144-2013 (да/нет)	Процент выхода	Соответствие ГОСТ 32144-2013 (да/нет)
1	0	Да	<b>4,788</b>	Нет	<b>7,356</b>	Нет
2	0	Да	<b>4,441</b>	Нет	<b>6,731</b>	Нет
3	<b>0,069</b>	Нет	<b>2,428</b>	Нет	<b>2,914</b>	Нет

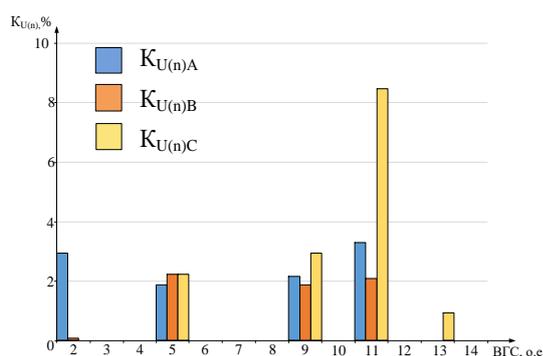
дем к детальному анализу несинусоидальности кривых напряжения ТКЗ. Здесь искажения КЭ проявляются для большего, чем у предыдущих ТК1 и ТК2, числа высших гармонических составляющих напряжения. Результаты анализа для ТКЗ представлены на рис. 2 и 3.

Анализируя данные рис. 2 и 3, можно сделать вывод, что качество электрической энергии на ТКЗ (тяговая подстанция Волочаевка на рис. 1) не соответствует требованиям ГОСТ 32144-2013 в отношении коэффициента гармонических составляющих  $K_{u(n)}$  для ВГС напряжения с номерами 2, 4, 9 по фазе А, для гармоник с номерами 2, 3, 11 по фазе В и для гармоник с номерами 9, 11 и 13 по фазе С.



**Рис. 2.** Количество значений  $K_{u(n)}$  в третьей точке контроля, которые превышают значения для 95 % времени замера по [2]

**Fig. 2.** Number of  $K_{u(n)}$  values exceeding the 95 % values of the sampling time according to [2]



**Рис. 3.** Количество значений  $K_{u(n)}$  в третьей точке контроля, которые превышают значения для 100 % времени замера по [2]

**Fig. 3.** Number of  $K_{u(n)}$  values exceeding the 100 % values of the sampling time according to [2]

В результате расчета суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения  $K_U$  выявлено, что значения  $K_U$  превышает требования для всех трех точек контроля [2].

Таким образом, для точек контроля КЭ, расположенных в системе внешнего электропитания с присоединенными тяговыми подстанциями фиксируется неудовлетворительное качество электрической энергии в отношении положительного отклонения напряжения и искажения синусоидальности кривых напряжения (причем искажения синусоидальности фиксируются по всем трем фазам напряжения).

Все остальные анализируемые ПКЭ в рассматриваемых точках контроля находятся в пределах установленных норм [2].

Важно отметить, что среди гармонических составляющих, по которым были выявлены превышения требований ГОСТ, третья гармоника напряжения практически не фигурирует. Ее превышение требованиям норм зафиксировано только по одной фазе и только для одной ТКЗ. Как правило, именно третьей гармонике напряжения, фиксируемой на шинах высшего напряжения тяговых подстанций, соответствует наибольшее (или второе – третье) по величине амплитудное значение из всех высших гармонических составляющих напряжения, поэтому ее нередко называют в числе преобладающих гармоник [25, 26]. В проведенном анализе, как можно заключить, третья гармоника напряжения преобладающей с точки зрения ухудшения КЭ не является.

Результатирующая сводка по ПКЭ не удовлетворяющим требованиям ГОСТ 32144-2013, для трех точек контроля, к которым подключаются тяговые подстанции, приведена в табл. 2.

**Табл. 2.** Результаты анализа качества электрической энергии

**Table 2.** Power quality analyses summary

Точки контроля	Наименование показателей качества электрической энергии, не удовлетворяющих требованиям ГОСТ 32144-2013
1	$\delta U_{ca(+)}$ , $\delta U_{ab(+)}$ , $K_{UA}$ , $K_{UB}$ , $K_{UC}$ , $K_{UA(5)}$ , $K_{UA(9)}$ , $K_{UB(5)}$ , $K_{UB(9)}$ , $K_{UC(5)}$ , $K_{UC(9)}$
2	$\delta U_{ca(+)}$ , $\delta U_{ab(+)}$ , $K_{UA}$ , $K_{UB}$ , $K_{UC}$ , $K_{UA(5)}$ , $K_{UA(9)}$ , $K_{UB(5)}$ , $K_{UB(9)}$ , $K_{UC(5)}$ , $K_{UC(9)}$
3	$\delta U_{bc(+)}$ , $\delta U_{ca(+)}$ , $\delta U_{a(+в)}$ , $K_{UA}$ , $K_{UB}$ , $K_{UC}$ , $K_{UA(2)}$ , $K_{UA(5)}$ , $K_{UA(9)}$ , $K_{UA(11)}$ , $K_{UB(2)}$ , $K_{UB(5)}$ , $K_{UB(9)}$ , $K_{UC(5)}$ , $K_{UC(9)}$ , $K_{UC(11)}$ , $K_{UC(13)}$

Как следует из результатов анализа ПКЭ для трех точек контроля, сама неудовлетворительная ситуация по КЭ наблюдается в ТКЗ, где подключается тяговая подстанция Волочаевка.

Можно предположить, что дополнительными факторами, ухудшающими качество электрической энергии, помимо основного искажающего фактора – наличия мощных тяговых нагрузок железнодорожного транспорта являются особенности схемы питания трех тяговых подстанций от сети внешнего электроснабжения и близость специфического крупного узла – ПС Хабаровская 500 кВ, через которую проходят транзитные потоки мощности.

### Заключение

В результате проведенного анализа правовых и экономических аспектов в области качества электрической энергии выявлена потребность в нормативно-правовом урегулировании ряда вопросов касательно доли вклада участников электроснабжения в ухудшение КЭ, определения и закрепления в российском законодательстве мер для активизации сил производителей, поставщиков, и потребителей, направленных на повышение КЭ.

Произведенный анализ показателей качества электрической энергии для трех точек магистральной электрической сети с присоединенными тяговыми подстанциями показал отсутствие проблем с симметрией напряжения в точках контроля, но выявил неудовлетворительную ситуацию с гармоническими искажениями фазных напряжений и положительным отклонением напряжения. КЭ в точках контроля с подключенными тяговыми подстанциями признано неудовлетворительным по трем ПКЭ – положительному отклонению напряжения  $\delta U_{(+)}$ , коэффициенту  $n$ -ной гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$  и суммарному коэффициенту искажения кривой напряжения  $K_U$ .

Нужно отметить, что технические возможности используемой в настоящем времени АСМ на участке энергосистемы ПАО «ФСК ЕЭС», необходимо функционально расширить и оборудовать дополнительным расчетным блоком, чтобы стало возможным проводить проверку на степень соответствия ПКЭ требованиям ГОСТ 32144-2013 [2] непосредственно при мониторинге КЭ.

### Список литературы

1. Карташов И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Управление качеством электроэнергии: учебное пособие. Москва: Издательский дом МЭИ. 2017. 347 с.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
3. Макашева С.И., Пинчуков П.С. Качество электрической энергии: мониторинг, прогноз, управление. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2020. 114 с.
4. Вагин Г.Я., Куликов А.Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции. 2019. № 6 (1055). С. 54–59.
5. Висящев А.Н., Федосов Д.С. Оценка влияния потребителей на искажение напряжения в электрической сети // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 3 (48). С. 46–51.
6. Montoya F.G., García-Cruz A., Montoya M.G., Manzano-Agugliaro F. Power quality techniques research worldwide: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, Vol. 54, Pp. 846–856. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.091.
7. Makasheva S., Pinchukov P., Szoltysek J. The Power Quality as a Pretext for Developing Smart City Concepts // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2020, pp. 1–7. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271462.
8. Кудряшев Г.С., Третьяков А.Н. Эффективность снижения уровня несинусоидальности напряжения на сельскохозяйственных предприятиях Иркутской области // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 6 (200). С. 121–128.
9. Mahela P., Shaik A.G., Gupta N. A critical review of detection and classification of power quality events // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 41. Pp. 495–505. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.070.
10. Hong W., Liu Z., Wu X. Power quality disturbance recognition based on wavelet transform and convolutional neural network // 2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA). 2021. Pp. 193–197. DOI: 10.1109/ICAICA52286.2021.9498060.
11. Кузнецов А.В., Чикин В.В. Управление качеством электроэнергии в электроэнергетической системе // Промышленная энергетика. 2021. № 5. С. 53–59. DOI: 10.34831/EP.2021.30.84.008.
12. André L., David T., Hugo V.N., Hugo F.V. Novelty detection and multi-class classification in power distribution voltage waveforms // Expert Systems with Applications. 45. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.09.048.

13. Кононенко В.Ю., Мурачев А.С., Смоленцев Д.О. Задачи научно-технической политики в области качества электроэнергии на современном этапе формирования цифровой экономики РФ // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2018. №2(47). С. 28–31.
14. Бартоломей П.И., Паздерин А.А., Паздерин А.В. Направления совершенствования системы оплаты услуг на передачу электроэнергии с учетом международного опыта // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2019. № 5 (56). С. 66–71.
15. Макашева С.И., Пинчуков П.С. Качество тока: аспекты оценки и нормирования // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2020. Т. 20. № 4. С. 23–35. DOI: 10.14529/power200403.
16. Овсейчук В.А. Федеральный Закон «Об электроэнергетике»: о необходимости внесения изменений или разработки нового документа // *Новости электротехники*. 2015. № 1(91). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2015/91/03.php>.
17. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Cost reduction ability by electricity tariff selection for construction facilities located in non-price areas // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. DOI:10.1051/mateconf/20168605025.
18. Bulycheva E., Yanchenko S. Online determination of varying harmonic load contribution to grid voltage distortion // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2020. Pp. 1–6, DOI:10.1109/ICIEAM48468.2020.9112017.
19. Gonzalez-Abreu A.-D., Delgado-Prieto M., Osornio-Rios R.-A., Saucedo-Dorantes J.-J., Romero-Troncoso R.-d.-J. A novel deep learning-based diagnosis method applied to power quality disturbances // *Energies*. 2021. No. 14. Pp. 2839. DOI: 10.3390/en14102839.
20. Mariscotti A.; Sandrolini L. Detection of harmonic overvoltage and resonance in AC railways using measured pantograph electrical quantities // *Energies*. 2021. № 14. С. 5645. DOI:10.3390/en14185645.
21. Тигунцев С.Г., Турдиев А.Т., Ахмедов С.Б. Исследование методики оценки вклада участников электроснабжения в качество электрической энергии // *Электрические станции*. 2020. № 6 (1067). С. 29–34.
22. Кудряшев Г.С., Селезнёв А.С., Федосов Д.С. Выявление источников искажения формы кривой напряжения в электроэнергетических системах // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2014. Т. 2. № 3. С. 59–65.
23. Макашева С.И. Автоматизированная система мониторинга как инструмент бережливого производства системы тягового электроснабжения // *Электротехника*. 2016. № 2. С. 52–55.
24. Klyuev R.V., Fomenko O.A., Gavrina O.A., Sokolova A.A., Dzeranov B.V., Morgoev I.D., Zaseev S.G. Analysis of non-sinusoidal voltage at metallurgical enterprises // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 663. Pp. 012032 DOI: 10.1088/1757-899X/663/1/012032.
25. Макашева С.И., Пинчуков П.С., Мамаев А.Р., Терлецкий С.Г. Оценка качества напряжения на шинах 27,5 кВ тяговой подстанции с устройством продольной емкостной компенсации // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2020. № 3(88). С. 11–20.
26. Kaleybar H.J., Brenna M., Foiadelli F., Fazel S.S., Zaninelli D. Power quality phenomena in electric railway power supply systems: an exhaustive framework and classification // *Energies*. 2020. No. 13. Pp. 6662. DOI: 10.3390/en13246662.

### References

1. Kartashov I.I., Tul'skiy V.N., Shamonov R.G. *Upravlenie kachestvom elektroenergii: uchebnoe posobie* [Quality control of electric power: textbook]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2017. 347 p.
2. GOST 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv ehlektromagnitnaya. Normy kachestva ehlektricheskoy ehnergii v sistemakh ehlektrosnabzheniya obshhego naznacheniya* [State Standard 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Introduced 2014-07-01. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p.
3. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. *Kachestvo elektricheskoy energii: monitoring, prognoz, upravlenie* [The electric energy quality: monitoring, forecast, management]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2020. 114 p.
4. Vagin G.Y., Kulikov A.L. *Kachestvo elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya. Analiz sostoyaniya metodov normirovaniya i kontrolya* [The power quality in power supply systems. Analysis of the state of the methods of regulation and control] *Elektricheskie stantsii* [Power stations]. 2019, No. 6 (1055), pp. 54–59.
5. Visyashchev A.N., Fedosov D.S. *Otsenka vliyaniya potrebiteley na iskazhenie napryazheniya v elektricheskoy seti* [Estimation of consumer impact on voltage distortion in electric network]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electric power. Transmission and distribution]. 2018, No. 3 (48), pp. 46–51.
6. Montoya F.G., Garcia-Cruz A., Montoya M.G., Manzano-Agugliaro F. Power quality techniques research worldwide: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, Vol. 54. pp. 846–856. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.091.
7. Makasheva S., Pinchukov P., Szoltysek J. The Power Quality as a Pretext for Developing Smart City Concepts 2020 *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 2020. pp. 1–7. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271462.
8. Kudryashev G.V., Tretyakov A.N. *Effektivnost' snizheniya urovnya nesinusoidal'nosti napryazheniya na sel'sko-hozyaystvennykh predpriyatiyakh Irkutskoy oblasti* [The effectiveness of reducing the level of nonsinusoidal voltage in agricultural enterprises of the Irkutsk region]. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Agricultural University], 2021, No. 6 (200), pp. 121–128.
9. Mahela P., Shaik A.G., Gupta N. A critical review of detection and classification of power quality events. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 41. pp. 495–505. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.070.
10. Hong W., Liu Z., Wu X. Power quality disturbance recognition based on wavelet transform and convolutional neural network. *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)*. 2021. pp. 193–197. DOI: 10.1109/ICAICA52286.2021.9498060.

11. Kuznetsov A.V., Chikin V.V. Upravlenie kachestvom elektroenergii v elektroenergeticheskoy sisteme [Power quality management in the electric power system] *Promyshlennaya energetika [Industrial Energy]*. 2021, No. 5, pp. 53–59. DOI: 10.34831/EP.2021.30.84.008.
12. André L., David T., Hugo V.N., Hugo F.V. Novelty detection and multi-class classification in power distribution voltage waveforms. *Expert Systems with Applications*. 45. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.09.048.
13. Kononenko V.Yu., Murachev A.S., Smolentsev D.O. Zadachi nauchno-tehnicheskoy politiki v oblasti kachestva elektroenergii na sovremennom etape formirovaniya cifrovoy ekonomiki RF [The tasks of scientific and technical policy in the field of power quality at the present stage of digital economy development in the Russian Federation]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie [Electricity. Transmission and distribution]*. 2018, No. 2(47), pp. 28–31.
14. Bartolomej P.I., Pazderin A.V., Pazderin A.A. Napravleniya sovershenstvovaniya sistemy oplaty uslug na peredachu elektroenergii s uchetom mezhdunarodnogo opyta [Directions of improving the electric energy transmission tariff system taking into account international experience]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie [Electricity. Transmission and distribution]*. 2019, No. 5 (56), pp. 66–71.
15. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Kachestvo toka: aspekty ocenki i normirovaniya [Current quality: assessment and standardization aspects]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetika [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering]*. 2020. Vol. 20, No. 4, pp. 23–35. DOI: 10.14529/power200403.
16. Ovseichuk V.A. Federal'nyy Zakon «Ob elektroenergetike»: o neobходимosti vneseniya izmeneniy ili razrabotki novogo dokumenta [Federal Law «On Electric Power Industry»: On the need to amend or develop a new document]. *Novosti elektrotehniki [Electrical Engineering News]*. 2015, No. 1(91).
17. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Cost reduction ability by electricity tariff selection for construction facilities located in non-price areas *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. DOI:10.1051/mateconf/20168605025.
18. Bulycheva E., Yanchenko S. Online determination of varying harmonic load contribution to grid voltage distortion 2020 *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2020. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112017.
19. Gonzalez-Abreu A.-D., Delgado-Prieto M., Osornio-Rios R.-A., Saucedo-Dorantes J.-J., Romero-Troncoso R.-d.-J. A novel deep learning-based diagnosis method applied to power quality disturbances. *Energies*. 2021. No. 14. pp. 2839. DOI: 10.3390/en14102839.
20. Mariscotti A., Sandrolini L. Detection of harmonic overvoltage and resonance in ac railways using measured pantograph electrical quantities. *Energies*. 2021. No. 14. pp. 5645. DOI:10.3390/en14185645.
21. Tiguncev S., Turdiev A., Akhmedov S. Issledovanie metodiki ocenki vklada uchastnikov elektrosnabzheniya v kachestvo elektricheskoy energii. [Research of the methodology for assessing the contribution of electricity supply participants to the quality of electric energy]. *Elektricheskie stantsii [Electrical stations]*. 2020, No. 6 (1067), pp. 29–34.
22. Kudryashev G.V., Seleznev A.S., Fedosov D.S. Vyyavlenie istochnikov iskazheniya formy krivoy napryazheniya v elektroenergeticheskikh sistemakh [Identification of voltage waveform distortion sources in electric power systems]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]*. 2014. Vol. 2, No. 3, pp. 59–65.
23. Makasheva S.I. Avtomatizirovannaya sistema monitoringa kak instrument berezhlivogo proizvodstva sistemy tyagovogo ehlektrosnabzheniya [An automated monitoring system as an instrument of lean production of a traction power supply system]. *Elektrotehnika [Electrotechnical]*. 2016. Vol. 87, No. 2, pp. 107–109.
24. Klyuev R.V., Fomenko O.A., Gavrina O.A., Sokolov A.A., Sokolova O.A., Dzeranov B.V., Morgoev I.D., Zaseev S.G. Analysis of non-sinusoidal voltage at metallurgical enterprises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 663, pp. 012032 DOI: 10.1088/1757-899X/663/1/012032.
25. Makasheva S.I., Mamaev A.R., Pinchukov P.S., Terleckiy S.G. Otsenka kachestva napryazheniya na shinah 27,5 kV tyagovoy podstancii s ustroystvom prodol'noy emkostnoy kompensatsii [Estimate of voltage quality on traction substation buses of 27.5 kV with longitudinal capacitive compensation device]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Bryansk State Technical University]*. 2020, No. 3 (88), pp. 11–20. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-3-11-20.
26. Kaleybar H.J., Brenna M., Foadelli F., Fazel S.S., Zaninelli D. Power quality phenomena in electric railway power supply systems: an exhaustive framework and classification. *Energies*. 2020, No. 13. pp. 6662. DOI: 10.3390/en13246662.

### Информация об авторах

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

### Information about the authors

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

## Методология моделирования грузовых перевозок на основе статистических данных товарных групп

О. А. Лебедева<sup>1</sup>✉, В. Е. Гозбенко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ kravhome@mail.ru

### Резюме

В статье обозначена проблема генерации грузовых перевозок на основе имеющейся статистики по товарным группам в количественном выражении. Транспортная модель – важный инструмент планирования и развития транспортной инфраструктуры. Его роль заключается в выявлении узких мест в моделируемой транспортной инфраструктуре. Представленная методология определяет процедуру обработки транспортной модели в зависимости от целей, задач и планируемых инвестиционных затрат. Возможно применение в новых транспортных проектах, ведущих к изменению качества, объема или надежности функционирования транспортной инфраструктуры. Моделирование и анализ данных об интенсивности – это один из способов прогнозирования спроса на перевозки и поведение населения на исследуемой территории, а также планирование перспективных маршрутных схем движения. Для каждой транспортной задачи существует несколько возможных альтернативных решений, некоторые из них представлены в виде инвестиционных проектов. Однако тестирование нескольких альтернативных проектов в полевых условиях практически невозможно из-за сложности и/или высокой стоимости. Транспортное моделирование позволяет осуществить апробацию множества вариантов. Финансовые затраты и трудоемкость при применении имитационного моделирования минимальны. Транспортные модели условно можно разделить в зависимости от протяженности моделируемой территории, вида (видов) транспорта, временных затрат; доступности программного пакета. Транспортные модели, используемые на практике, часто представляют собой комбинацию типов моделей. Различные типы транспортных моделей строго не определены и могут пересекаться. Таким образом, с использованием методологии моделирования грузовых перевозок на основе статистических данных товарных групп, транспортной модели, становится возможно повышение эффективности работы мультимодальной сети посредством восстановления матрицы корреспонденций.

### Ключевые слова

моделирование, грузовые перевозки, транспортная инфраструктура, методология моделирования, статистические данные

### Для цитирования

Лебедева О. А. Методология моделирования грузовых перевозок на основе статистических данных товарных групп / О. А. Лебедева, В. Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 152–160. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).152-160

### Информация о статье

поступила в редакцию: 09.09.2021, поступила после рецензирования: 18.09.2021, принята к публикации: 21.09.2021

## Methodology for modeling freight transportation based on statistical data of commodity groups

O.A. Lebedeva<sup>1</sup>, V.E. Gozbenko<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup> Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ kravhome@mail.ru

### Abstract

The article outlines the problem of generating freight traffic based on the available statistics for product groups in quantitative terms. The transport model is an important tool for planning and developing transport infrastructure. Its role is to identify bottlenecks in the simulated transport infrastructure. The presented methodology determines the procedure for processing the transport model depending on the goals, objectives and planned investment costs. It can be applied to new transport projects leading to a change in the quality, volume or reliability of the transport infrastructure. Modeling and analyzing intensity data is one of the ways to predict the demand for transportation and the behavior of the population in the area in question, as well as planning future route patterns. There are several possible alternative solutions for each transport problem, some of which are presented in the form of investment projects. However, testing multiple alternative designs in the field is nearly impossible due to the complexity and / or high cost. Transport modeling allows a variety of options to be tested. The financial costs and labor intensity when using simulation modeling are minimal. Transport models can be conditionally divided depending on: the length of the simulated terri-

tory, type (s) of transport, time costs; availability of the software package. Transport models used in practice are often a combination of model types. The different types of transport models are not strictly defined and may overlap. Thus, using the methodology for modeling freight traffic based on statistical data of commodity groups or a transport model, it becomes possible to increase the efficiency of the multimodal network by restoring the correspondence matrix.

### Keywords

modeling, freight transport, transport infrastructure, modeling methodology, statistic data

### For citation

Lebedeva O. A., Gozbenko V. E. Otsenka gruzovoy matritsy korrespondentsiy s uchetom dannykh tovarno-transportnykh nakladnykh i intensivnosti dvizheniya [Metodologiya modelirovaniya gruzovykh perevozk na osnove statisticheskikh dannykh tovarnykh grupp]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 152–160. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).152-160

### Article Info

Received: 09.09.2021, Revised: 18.09.2021, Accepted: 21.09.2021

### Введение

Транспортные модели в настоящее время играют важную роль в процессе принятия решений относительно направления политики и инвестиций сектора. Их применение варьируется в зависимости от предмета анализа и оценки мер по смягчению последствий из-за роста мировой автомобилизации. Процедуры, применяемые при проектировании транспортной модели, зависят от ее назначения и задач, для которых она разрабатывается [1–10]. Основная цель транспортной модели – провести квалифицированную оценку мер, направленных на оптимизацию существующей пропускной способности и планируемую транспортную инфраструктуру с возможностями перераспределения части грузовых перевозок на более экологически безопасные виды транспорта (железнодорожный и внутренний водный транспорт).

Это подразумевает необходимость разработки модели мультимодальных перевозок, в которую будет интегрирована транспортная сеть тех видов транспорта, которые имеют отношение к проекту (автомобильный, железнодорожный и внутренний водный транспорт). Цель моделирования связана с необходимостью унификации подходов заинтересованных стран в области разработки транспортной политики для создания современной транспортной инфраструктуры, удовлетворяющей растущему спросу на транспортные услуги. Определим основные цели транспортной модели:

1. Оценка текущего состояние грузовых перевозок (автомобильный, железнодорожный и внутренний водный транспорт, включая терминалы интермодальных перевозок) должна учитывать запланированные стратегические мероприятия на исследуемой территории. Результа-

том моделирования станет выражение доли водного и железнодорожного грузового транспорта, и его потенциала для достижения целей (перевод автомобильного грузового транспорта протяженностью более 300 км на другие виды транспорта – не менее 30 %).

2. Если модель не демонстрирует перераспределение транспортного потока, то целью является моделирование альтернативных сценариев развития на основе запланированных мер, вытекающих из стратегий развития региона с перераспределением грузовых перевозок между видами транспорта. Впоследствии проводится анализ узких мест в сети мультимодальных перевозок для их устранения.

Методы и процедуры, необходимые для разработки транспортной модели, основываются на цели и задачах проекта [11–24]. Транспортная модель состоит из двух подмоделей:

- модель соответствующей территории, включая внутренние и межзональные транспортные отношения;
- модель прилегающей территории, включая межзональные дороги и международное движение.

### Процедура расчета грузовой транспортной модели

Модель грузовых перевозок на базе статистических данных товарных групп, основана по сравнению с классическим четырехэтапным подходом на упрощенной процедуре (рис. 1). Текущий спрос на грузовые перевозки моделируется с применением генерации грузовых перевозок на основе имеющейся статистики по товарным группам, выраженной в количественном выражении (т / год) для каждой зоны. Распределение грузовых перевозок выражается

в виде грузопотоков (т/год) между зонами в зависимости от параметров, их характеризующих. Предметом моделирования интенсивности потоков являются только этапы, связанные с выбором режима доставки и назначением маршрутов в сети. Выбор вида транспорта связан с межзонными потоками (т/год) для каждого вида транспорта. Впоследствии объемы товарных потоков в количественных единицах преобразуются в транспортные средства, осуществляющие перевозочный процесс между зонами. Выделение в сеть осуществляется посредством ввода данных на отдельных транспортных участках. Эта нагрузка на транспортную сеть обрабатывается, в том числе учитываются холостые ездки.

### Исследуемая территория и ее зональное деление

В процессе разделения на зоны для транспортного моделирования, можно выделить следующие этапы:

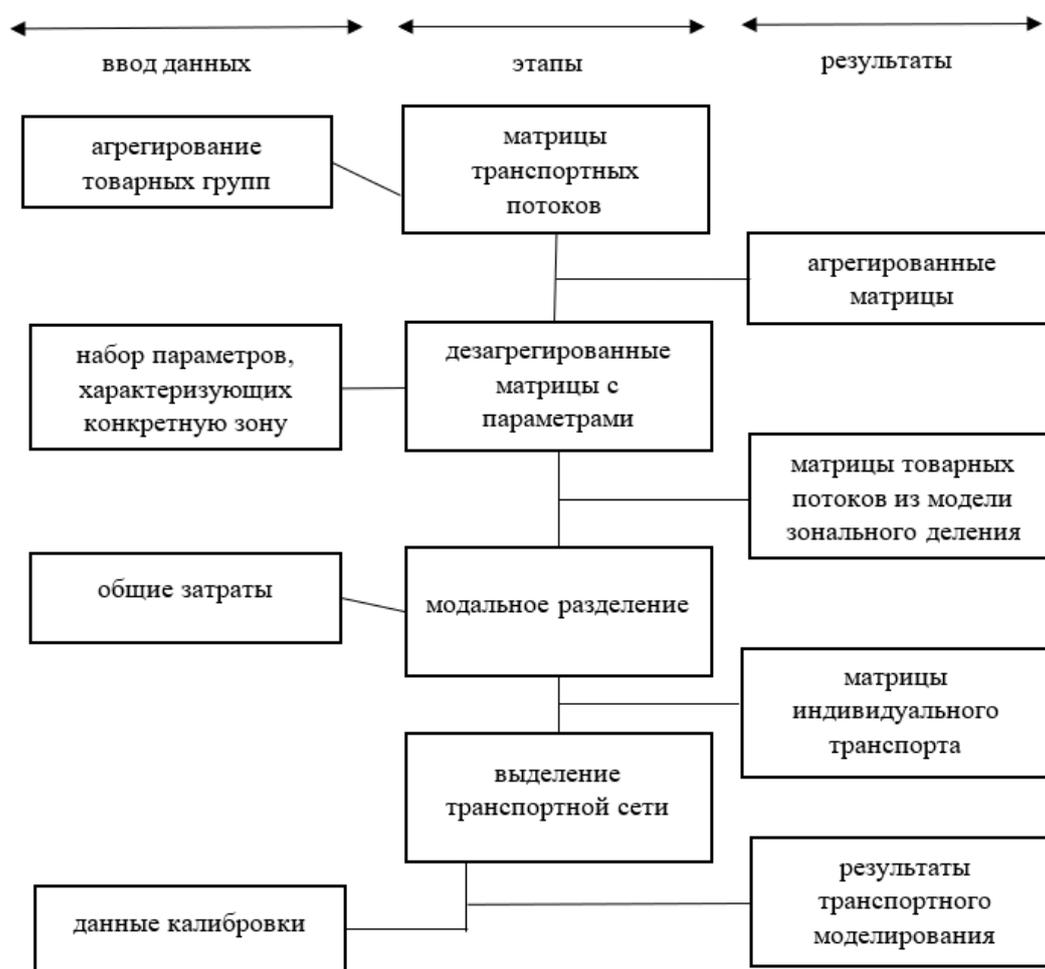
1. Поездки к месту приложения труда и обратно:

- количество рабочих мест (сотрудников) на исследуемой территории (база данных рабочих мест или база данных сотрудников / работодателей; выборочное обследование работающего населения; данные переписи населения; данные о работодателях);

- анкетные опросы;

- анализ данных с SIM-карт.

2. Подвижность относительно учебных



**Рис. 1.** Модель грузовых перевозок на основе статистических данных товарных групп  
**Fig. 1.** Model of freight traffic based on statistical data of commodity groups

заведений (поддержка науки, исследований, разработок, инноваций и образования):

– количество мест в учебных заведениях (или площадь помещений).

3. Удовлетворение иных потребностей:

– подвижность к объектам государственного управления, торговым центрам и магазинам, здравоохранения, досуга.

Данные, основанные на фактической посещаемости объектов розничной торговли в небольших выборках могут быть обобщены, а привлекательность определена оценкой демографических показателей.

В крупномасштабных моделях, учитывающих геолокацию, цели поездок должны быть определены точно относительно типичного поведения транспортных потоков. Также следует учитывать более высокую привлекательность при поездках в пределах административных единиц. В этом случае необходимо учитывать типы зон (деловая, рекреационная) согласно действующему плану зонирования. Также учитываются поездки на дальние расстояния, межгосударственный транспорт.

Зонирование должно быть проведено таким образом, чтобы обеспечить использование исходных данных и полученных знаний о закономерностях с существующими транспортными моделями.

### Транспортное предложение

Транспортное предложение определяется сетью, состоящей из узлов (соответствующих центроидов) и ребер (соединений между транспортными зонами). Ребрам присваиваются следующие параметры: длина; время ездки подвижного состава; затраты на ездку; параметры, влияющие на время и стоимость ездки (пропускная способность, горная местность, северные районы).

Транспортная сеть является основой моделирования транспортных потоков. Данные, характеризующие ее параметры, являются относительно доступными и имеют различное качество. Объем структуры транспортной сети варьируется в зависимости от цели, для которой разработана эта модель. Транспортная сеть может состоять из разных видов транспорта. Рассмотрим сеть, состоящую из инфраструктуры автомобильного, железнодорожного и внутреннего водного транспорта со следующим уровнем детализации:

1. Сеть в транспортной модели исследуемой территории включает всю инфраструктуру до уровня детализации дорог категорией ниже. Местные дороги часто используются только для ограниченного распределения и замены их «ребрами» графа.

2. Железнодорожная транспортная сеть рассматривается в пределах исследуемой территории со станциями, включая маршруты.

3. Сеть внутренних водных путей интегрируется в модель в пределах судоходных участков водных путей IV и V классов и выше для исследуемой территории.

4. В модели сеть грузовых перевозок учитывается в определенных типах звеньев для автомобильных, железнодорожных и внутренних водных грузовых перевозок, а также включает индивидуальные интермодальные перевозки.

Каждому типу транспорта моделируемой инфраструктуры должны быть присвоены соответствующие подсистемы, основные характеристики и технические параметры сети. Помимо звеньев транспортная сеть включает в себя узлы, представляющие перекрестки, точки соединения зон движения или станции с определенными параметрами.

### Исходные данные для модели

Данные, характеризующие предложение грузовых перевозок, отличаются от структуры, применяемой к моделям пассажирского транспорта. Для транспортной модели решающее значение имеет перемещение товаров с автомобильного транспорта на железнодорожный и внутренний водный соответственно, структура параметров транспортной сети включает данные о грузоподъемности и ограничениях на грузовые перевозки.

Определение спроса на перевозки в форме матриц корреспонденций в модели основано на объеме отправок грузовых товаров. Источниками данных являются статистические отчеты о производстве / потреблении и импорте / экспорте отдельных групп товаров. Модели вариантов загрузки, разгрузки и транспорта для конкретной товарной группы представляют собой основу расчета для последующих этапов транспортного моделирования. Исследования спроса на грузовые перевозки, проведенного между крупными производственными объектами и перевозчиками, зарегистрированными на территории, будут использоваться в качестве

дополнительного источника информации. Для перераспределения агрегированных товарных групп по отдельным зонам используются данные, характеризующие их относительно целей езды, численности населения, занятости в отраслях и других параметрах. Аналогичные матрицы также создаются за пределами исследуемой области, с зонами, имеющими потенциал для транзитного потока.

Далее приведены социально-экономические сведения, характеризующие привлекательность зоны для грузовых перевозок. Данные о населении:

- обобщенные данные о населении на муниципальном уровне;
- численность и состав населения;
- количество сотрудников, работающих в общеобразовательных учреждениях;
- численность учащихся школ;
- количество сотрудников среднего профессионального и высшего образования и их структура;
- численность студентов.

Данные о занятости:

- профессии по отраслям с геолокацией мест приложения труда;
- профессии в укрупненной группе (регионе, городе, области, крае, стране).

Статистические отчеты, описывающие взаимосвязи при перевозке грузов, необходимо разбить на более мелкие пространственные единицы (зоны) в соответствии с имеющимися данными и пространственной логикой. Процесс агрегации основан на применении релятивизирующего атрибута, который позволит перераспределить общие объемы товарных потоков на зональное деление в транспортной модели. Далее общие товарные потоки разделяются в соответствии с составом, применяемым в модели. Для этого этапа разукрупнения общего объема товаров по товарным группам на уровне зоны будут использоваться данные о численности занятых в сферах производства / потребления конкретной товарной группы или наличие значимого центра производства / потребления конкретной товарной группы. Для каждой товарной группы создается несколько пар «грузоотправитель – цель», для которых указывается вероятность их возникновения. Сумма вероятностей исходных вариантов объезда составляет продуктивность зоны, а для целевых путей – привлекательность для конкретной товарной группы.

### Обобщенные затраты

Специфика моделирования грузовых перевозок заключается в том, что в зависимости от наличия матриц спроса в транспортном моделировании необязательно выполнять этапы расчета, связанные с распределением путей проезда. Расчет обобщенных трудозатрат на каждый вид транспорта – это финансовое выражение путевых расходов, наибольшую долю которых составляет временной параметр, который конвертируется в денежные единицы через воспринимаемую стоимость времени. Для транспортной модели обобщенные затраты определяются как:

$$GN = \left(1 + \sum A_{STT}\right) \times (VT_{KS} \times t + TC_{DS} \times I) + K_{DS},$$

где  $GN$  – обобщенные затраты;  $A_{STT}$  – атрибут транспортной сети;  $VT_{KS}$  – воспринимаемая стоимость времени для данной товарной группы;  $t$  – время в пути в часах;  $TC_{DS}$  – транспортные расходы на данном виде транспорта;  $I$  – расстояние в км;  $K_{DS}$  – постоянная транспортной системы [24].

Концепция воспринимаемой ценности времени представляет цену времени при перевозке товаров с точки зрения грузоотправителей или экспедиторов при выборе вида транспорта. В дополнение к компоненту цены на сырьевые товары, выводятся показатели надежности транспортного средства, риска заторов или транспортной безопасности. Их денежное выражение определяется на основе результатов зарубежных исследований.

### Распределение езды

В модели этап распределения поездок на основе гравитационного метода не включен в виде алгоритма, так как на выбор пункта назначения для грузовых перевозок влияют несколько параметров, по которым нет описательной статистики. Однако для прогностической модели необходимо знать ход кривых распределения и их эластичность в зависимости от изменения обобщенных затрат в отношении перевозки товарных групп. Для оценки текущего состояния матриц спроса объем перевозок рассчитывался в соответствии с транспортным расстоянием. Определяются интервалы, при которых на кривой распределения происходят существенные изменения. Для каждого интервала вводится коэффициент (умножаются зна-

чения в базовой матрице корреспонденций) для адекватной оценки общего объема товарного потока относительно изменения расстояний транспортировки. Этот этап изменит ход кривой и уравнивает распределение на дальние и короткие расстояния. Аналогичная процедура реализуется для каждой товарной группы.

Распределение поездов рассчитывалось аналогично генерации, отдельно для каждой категории с использованием модели двустороннего взаимодействия, в которой объемы товарных потоков разделяются между зонами отправления и назначения (т / год). Расчет производится в два этапа:

1. Расчет индикаторных матриц по импедансу между транспортными зонами.

2. Расчет матриц товарных потоков (выраженных в тоннах в год) на основе оценочных матриц корреспонденций.

Матрица затрат рассчитывается в денежном выражении с использованием функции импеданса матрицы расстояний.

Синтетические модели не используются для определения распределения между зонами отправления и назначения, так как они не отражают реальное состояние. Практическая апробация показала, что распределение потоков зависит только от изменений в генерации. Однако изменения в матрице импеданса влияют на выбор графика работы и маршрута транспортировки, который основан на обобщенных затратах. Общие затраты и время представляют собой денежные и неденежные издержки на автомобильные, железнодорожные и водные пути и логистику. Они включают затраты, связанные с временем, расстоянием транспортировки и логистическими задачами. Стоимость в рамках модели определяется как:

– временные затраты, связанные с видами транспорта и потерей стоимости товаров по категориям;

– затраты, связанные с расстоянием, с видами транспорта;

– затраты на логистику – стоимость погрузо-разгрузочных работ и перевалки.

При выборе видов транспорта учитываются:

– атрибуты сети – графики работы, скоростной режим;

– система логистики, разделение товаров по видам групп.

Таким образом, для каждой из логистических систем разделяются затраты, зависящие от

расстояния, временные на погрузку, разгрузку и погрузочно-разгрузочные работы, а также фиксированные. Каждый товар относится к мультимодальной сети посредством итеративной процедуры восстановления матрицы корреспонденций. Результатом является выбор наиболее экономически выгодных видов транспорта и маршрута для каждой возможной пары пунктов.

Стоимость затрат на терминале не установлена. Время транспортировки включает управление подвижным составом, погрузку, разгрузку, обработку, а также время ожидания. Чем больше времени затрачивается на обработку и транспортировку товара, тем больше стоимостная потеря.

Выбор вида транспорта в первую очередь зависит от размера и объема отправки.

Основой для моделей прогнозирования спроса на грузовые перевозки является валовый внутренний продукт и производство по секторам. Эти данные зависят не только от экономического роста и уровня занятости, но и потенциального потребления и добавленной стоимости.

### Распределение потока в сети

Плотность транспортной сети задается на основе стохастического алгоритма, учитывающего, что перевозчики стремятся к маршрутам с наименьшими обобщенными затратами (возможны отклонения, связанные с отсутствием исчерпывающей информации).

Алгоритм стохастического распределения основан на поиске всех альтернативных маршрутов, по которым происходит распределение потребности в транспорте. В исследовании используется метод присвоения равновесия с учетом пропускной способности транспортной сети. Для устранения ошибок на этапах расчета весь процесс носит итерационный характер.

Выбор вида транспорта или их комбинации определяется в зависимости от плотности мультимодальной сети (по отдельным группам товаров). Выбор графика работы и маршрута основаны на обобщенных затратах и рассчитываются одновременно для всех возможных комбинаций.

Логистические системы классифицируются в зависимости от требований к транспортировке товаров. В логистических моделях системы условно подразделяют на жидкости (нефтепродукты); жидкости (пищевые продук-

ты); сыпучие товары (сырье); сыпучие товары (строительные материалы); насыпные товары (продукты питания и корма); товары (упакованные в мешки); контейнеры; специальные грузовые автомобили; продукты, требующие при транспортировке соблюдения специального температурного режима.

### Калибровка и валидация

Калибровка – это корректировка модели таким образом, чтобы моделируемые величины соответствовали наилучшим из найденных значений. Качество калибровки оценивается статистически с помощью программного обеспечения и проверяется на соответствие смоделированным и реальным данным. Для количественного выражения качества калибровки применен общепринятый метод статистики, математические обозначения которого следующие:

$$GEN = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}},$$

где  $M$  – рассчитанная часовая интенсивность;  $C$  – фактическая часовая интенсивность.

Выбор метода основан на необходимости устранения задачи, связанной с процентным соотношением отклонения интенсивности между рассчитанными и реальными данными.

Верификация транспортного моделирования осуществляется непрерывно на отдельных этапах и фокусируется на следующих предметных областях:

– проверка методологической процедуры (исходные данные, вид транспортного моделирования);

– проверка определенных сегментов (матрица, методы анализа модели);  
– проверка функциональности (параметры транспортной сети).

Базовый уровень валидации транспортного моделирования осуществляется через единицу груза (количество т / год). В транспортных моделях эти единицы связаны с грузовыми транспортными средствами на средний рабочий день.

На этапе калибровки модели распределения грузовых потоков и транспортных расходов корректируются таким образом, чтобы воспроизводились реалистичные данные.

При проверке адекватности модели целесообразно использовать коэффициент корреляции, соответствующий отклонению RMSE, GEN.

### Заключение

Представленная в статье транспортная модель позволяет получить анализ текущего состояния перевозочного процесса, социально-экономические условия в исследуемой зоне и прогностические показатели.

Методология транспортной модели охватывает способ сбора входных данных, калибровку модели текущего состояния, валидацию и выходные данные модели (картограммы интенсивности движения товарных потоков (транспортных средств), периоды пиковой нагрузки, суточную нагрузку, состав движения, картограмму загруженности транспортной сети).

### Список литературы

1. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Моделирование грузовых перевозок в транспортной сети // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2016. № 10. С. 182–184.
2. Лебедева О.А., Антонов Д.В. Моделирование грузовых матриц корреспонденций гравитационным и энтропийным методами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5 (100). С. 118–122.
3. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Развитие городских грузовых систем с учетом концепции городского планирования // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 1. С. 244–247.
4. Федотова А.С., Лебедева О.А. Степень использования пропускной способности автомобильных дорог // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2015. Т. 1. № 1. С. 270–274.
5. Полтавская Ю.О. Применение геоинформационных систем для обеспечения устойчивого развития транспортной системы города // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине Сборник научных трудов VI Междунар. науч. конф. под редакцией О.Г. Берестневой, В.В. Спицына, А.И. Труфанова, Т.А. Гладковой. 2019. С. 164–167.
6. Полтавская Ю.О. Оптимизация транспортной сети на основе минимума общих затрат на доставку грузов // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. № 13. С. 178–183.
7. Шаров М.И., Михайлов А.Ю., Дученкова А.В. Пример оценки транспортной доступности с использованием программного продукта РТV «VISUM» // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2013. № 1(4). С. 133–138.
8. Лебедева О.А. Анализ проектирования транспортных зон на основе моделирования сети // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. № 13. С. 172–177.

9. Гозбенко В.Е., Крипак М.Н., Иванков А.Н. Совершенствование транспортно-экспедиционного обслуживания грузопользователей. Иркутск: Изд-во ИРГУПС, 2011. 176 с.
10. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. pp. 427–433.
11. Walancik M., Kurowska-Pysz J. Cross-border cooperation of local governments in the field of safety in Polish-Slovak projects. Theoretical approaches and a case study. *J. Def. Resour. Manag.* 2015, 6, pp. 45–54.
12. Guo R. Studying Borders. Evaluating Border Effects. *Cross-Border Resource Management*, 3rd ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018.
13. Castanho R.A., Cabezas J.; Fernández-Pozo L. Territorial Planning and Development Tools in Transboundary Areas. Study Case of the OTALEX-C Space. In Conference Paper, Proceedings of the Institute of Geography and Spatial Planning–University of Lisbon & International Journal of E-Planning Research, Lisbon, Portugal, 31 March–1 April 2016; Institute of Geography and Spatial Planning, University of Lisbon: Lisbon, Portugal, 2016.
14. Castanho R.A., Loures L., Cabezas J., Fernández-Pozo L. Cross-Border Cooperation (CBC) in Southern Europe—An Iberian Case Study. *The Eurocity ElvasBadajoz. Sustainability* 2017, 9, 360. [CrossRef]
15. Bufon M., Minghi J., Paasi A. (Eds.) *The New European Frontiers: Social and Spatial (Re) Integration Issues in Multicultural and Border Regions*; Cambridge Scholars Publishing: Cambridge, UK, 2014.
16. Balogh P. Pete M. Bridging the Gap: Cross-border Integration in the Slovak–Hungarian Borderland around Štúrovo–Esztergom. *J. Borderl. Stud.* 2018, 33, pp. 605–622.
17. Telle S., Svensson S. An organizational ecology approach to EGTC creation in East Central Europe. *Reg. Fed. Stud.* 2020, 30, pp. 47–71.
18. Kuzmin O.V., Seregina M.V. Plane sections of the generalised Pascal pyramid and their interpretations. *Discrete Mathematics and Applications*, 2010, 20(4), pp. 377–389.
19. Balagura A.A., Kuzmin O.V. Generalised Pascal pyramids and their reciprocals. *Discrete Mathematics and Applications*, 2007, 17(6), pp. 619–628.
20. Dohn K., Knop L., Kramarz M., Przybylska E. *Transport Intermodalny w Kontekście Rozwoju Regionalnego*, Wyd; Dom Organizatora: Toruń, Poland, 2019.
21. Jacyna-Golda I., Zak J., Golebiowski P. Models of traffic flow distribution for various scenarios of the development of proecological transport system. *Arch. Transp.* 2014, 32, pp. 17–28.
22. Roeder O., Sammer G., Riegler S., Klements R., Bezak B., Balko G. Challenges of border-crossing transport demand surveys – Methodical solutions and experiences with their organization to achieve high quality, an UE-perspective. *Transp. Res.* 2018, 32, pp. 394–403.
23. Nie T., Ye K. Demystifying the barriers to transport infrastructure project development in fast developing regions: The case of China. *Sustainability* 2017, 9, 1915.
24. Project TRANS TRITIA, D.T3.2.4 Report, Implementation plan for TRITIA region. URL: <https://www.interreg-central.eu/Content.Node/Implementation-plan-for-TRITIA-region.pdf>.

### References

1. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Modelirovaniye gruzovykh perevozok v transportnoy seti [Modeling of freight transport in the transport network]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Angara State Technical University]*. 2016. No. 10. pp. 182–184.
2. Lebedeva O.A., Antonov D.V. Modelirovaniye gruzovykh matrits korrespondentsiy gravitatsionnym i entropiynym metodami [Modeling of cargo correspondence matrices by gravity and entropy methods]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Irkutsk State Technical University]*. 2015. No. 5 (100). pp. 118–122.
3. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Razvitiye gorodskikh gruzovykh sistem s uchetom kontseptsii gorodskogo planirovaniya [Development of urban freight systems taking into account the concept of urban planning]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Collection of scientific papers of Angara State Technical University]*. 2016. Vol. 1. No. 1. pp. 244–247.
4. Fedotova A.S., Lebedeva O.A. Stepen' ispol'zovaniya propusknoy sposobnosti avtomobil'nykh dorog [The degree of utilization of the capacity of highways]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Collection of scientific papers of Angara State Technical University]*. 2015. Vol. 1. No. 1. pp. 270–274.
5. Poltavskaya Yu.O. Primeneniye geoinformatsionnykh sistem dlya obespecheniya ustoychivogo razvitiya transportnoy sistemy goroda [The use of geographic information systems to ensure the sustainable development of the city's transport system]. *Informatsionnyye tekhnologii v nauke, upravlenii, sotsial'noy sfere i meditsine. Sbornik nauchnykh trudov VI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Pod redaktsiyey O.G. Berestnevoy, V.V. Spitsyna, A.I. Trufanov, T.A. Gladkovoy [Information technologies in science, management, social sphere and medicine Collection of scientific papers VI Intern. scientific conf. edited by O.G. Berestneva, V.V. Spitsyna, A.I. Trufanova, T.A. Gladkova]*. 2019. pp. 164–167.
6. Poltavskaya Yu.O. Optimizatsiya transportnoy seti na osnove minimuma obshchikh zatrat na dostavku gruzov [Optimization of the transport network based on the minimum total costs for the delivery of goods]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Angarsk State Technical University]*. 2019. No. 13. pp. 178–183.
7. Sharov M.I., Mikhaylov A.Yu., Duchenkova A.V. Primer otsenki transportnoy dostupnosti s ispol'zovaniyem programmnoy produkta PTV «VISUM» [An example of assessing transport accessibility using the software product PTV "VISUM"]. *Izv. vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' [Izv. universities. Investments. Construction. Real estate]*. 2013. No. 1(4). pp. 133–138.

8. Lebedeva O.A. Analiz proyektirovaniya transportnykh zon na osnove modelirovaniya seti [Analysis of the design of transport zones based on network modeling]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Angarsk State Technical University]*. 2019. No. 13. pp. 172–177.
9. Gozbenko V.Ye., Kripak M.N., Ivankov A.N. Sovershenstvovaniye transportno-ekspeditsionnogo obsluzhivaniya gruzovladel'tsev [Improving forwarding services for cargo owners]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2011. 176 p.
10. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. pp. 427–433.
11. Walancik M., Kurowska-Pysz J. Cross-border cooperation of local governments in the field of safety in Polish-Slovak projects. *Theoretical approaches and a case study*. J. Def. Resour. Manag. 2015, 6, pp. 45–54.
12. Guo R. Studying Borders. Evaluating Border Effects. *Cross-Border Resource Management*, 3rd ed.; Elsevier:Amsterdam, The Netherlands, 2018.
13. Castanho R.A., Cabezas J.; Fernández-Pozo L. Territorial Planning and Development Tools in Transboundary Areas. Study Case of the OTALEX-C Space. In *Conference Paper, Proceedings of the Institute of Geography and Spatial Planning–University of Lisbon & International Journal of E-Planning Research, Lisbon, Portugal, 31 March–1 April 2016*; Institute of Geography and Spatial Planning, University of Lisbon: Lisbon, Portugal, 2016.
14. Castanho R.A., Loures L., Cabezas J., Fernández-Pozo L. Cross-Border Cooperation (CBC) in Southern Europe—An Iberian Case Study. *The Eurocity ElvasBadajoz. Sustainability* 2017, 9, 360. [CrossRef]
15. Bufon M., Minghi J., Paasi A. (Eds.) *The New European Frontiers: Social and Spatial (Re) Integration Issues in Multicultural and Border Regions*; Cambridge Scholars Publishing: Cambridge, UK, 2014.
16. Balogh P.6 Pete M. Bridging the Gap: Cross-border Integration in the Slovak–Hungarian Borderland around Štúrovo–Esztergom. *J. Borderl. Stud.* 2018, 33, pp. 605–622.
17. Telle S., Svensson S. An organizational ecology approach to EGTC creation in East Central Europe. *Reg. Fed. Stud.* 2020, 30, pp. 47–71.
18. Kuzmin O.V., Seregina M.V. Plane sections of the generalised Pascal pyramid and their interpretations. *Discrete Mathematics and Applications*, 2010, 20(4), pp. 377–389.
19. Balagura A.A., Kuzmin O.V. Generalised Pascal pyramids and their reciprocals. *Discrete Mathematics and Applications*, 2007, 17(6), pp. 619–628.
20. Dohn K., Knop L., Kramarz M., Przybylska E. *Transport Intermodalny w Kontekście Rozwoju Regionalnego*, Wyd. Dom Organizatora: Toruń, Poland, 2019.
21. Jacyna-Golda I., Zak J., Golebiowski P. Models of traffic flow distribution for various scenarios of the development of proecological transport system. *Arch. Transp.* 2014, 32, pp. 17–28.
22. Roider O., Sammer G., Riegler S., Klementschtz R., Bezak B., Balko G. Challenges of border-crossing transport demand surveys – Methodical solutions and experiences with their organization to achieve high quality, an UE-perspective. *Transp. Res.* 2018, 32, pp. 394–403.
23. Nie T., Ye K. Demystifying the barriers to transport infrastructure project development in fast developing regions: The case of China. *Sustainability* 2017, 9, 1915.
24. Project TRANS TRITIA, D.T3.2.4 Report, Implementation plan for TRITIA region. URL: <https://www.interreg-central.eu/Content.Node/Implementation-plan-for-TRITIA-region.pdf>.

### Информация об авторах

**Лебедева Ольга Анатольевна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: [kravhome@mail.ru](mailto:kravhome@mail.ru).

**Гозбенко Валерий Ерофеевич** – д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: [vgozbenko@yandex.ru](mailto:vgozbenko@yandex.ru).

### Information about the authors

**Ol'ga A. Lebedeva** – Ph.D. in Engineering Sciences, Assoc. Prof., Assoc. Prof. at the Subdepartment of Management of Automobile Transport, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: [kravhome@mail.ru](mailto:kravhome@mail.ru).

**Valerii E. Gozbenko** – Doctor in Engineering Sciences, Prof., Prof. at the Irkutsk State University of Railway Engineering, Irkutsk, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: [vgozbenko@yandex.ru](mailto:vgozbenko@yandex.ru).

## О влиянии задержек маршрутных поездов на восстановление графика движения поездов

А. Д. Доможирова✉, Р. Ю. Упырь

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

✉ domojirova.a@gmail.com

### Резюме

Главная цель функционирования железнодорожного транспорта – своевременная доставка пассажиров и грузов, однако не всегда удается этого достигнуть. В процессе работы железнодорожного транспорта могут возникать внештатные ситуации: технические, технологические, природного и техногенного характера. При таких отказах главной задачей считается минимизация временных потерь, а именно, сокращение продолжительности восстановления системы. Размеры временных потерь зависят от характера отказа, места его возникновения, организации работ по устранению последствий. Так, отказ подвижного состава, находящегося на станции, несет меньше потерь, чем отказ, возникший на перегоне. Внештатная ситуация, появившаяся на перегоне двухпутного участка, в целом потребует меньше корректировок в запланированном порядке пропуска поездов, чем на однопутном участке. Также от категории задерживающегося из-за отказа поезда зависит продолжительность восстановления системы организации движения. В статье представлен оригинальный подход описания процесса курсирования кольцевых маршрутных поездов при возникновении отказа, при котором поезд с начальной станции отправляется с опозданием. Представлен алгоритм восстановления системы обращения маршрутов на однопутном участке, описывающий исправление системы и результат отказа. Приведен график движения поездов в координатной системе, что позволило оценить отклонения от графика движения геометрически. На основе такой оценки предложена математическая модель устойчивого состояния системы курсирования кольцевых маршрутных поездов. Предлагаемое описание устойчивости курсирования кольцевых маршрутов в виде модели позволит оценить график движения поездов в зависимости от величины опозданий описанной категории поездов и количества линейных зависимостей.

### Ключевые слова

железнодорожный транспорт, кольцевой маршрутный поезд, график движения поездов, отклонения от графика планирования, опоздание поезда, временные потери

### Для цитирования

Доможирова А. Д. О влиянии задержек маршрутных поездов на восстановление графика движения поездов / А.Д. Доможирова, Р.Ю. Упырь // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 161–168. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).161-168

### Информация о статье

поступила в редакцию: 25.05.2021, поступила после рецензирования: 02.08.2021, принята к публикации: 15.09.2021

## On the influence of delays in route trains on the recovery of train graphics

A. D. Domojirova✉, R. Yu. Upyr

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

✉ domojirova.a@gmail.com

### Abstract

The main goal of railway transport is the timely delivery of passengers and goods, which cannot always be achieved. In the course of its work railway transport is faced with emergency situations: technical, technological, natural and man-made. In the event of such failures, the main thing is considered to be the minimization of time losses, and the reduction of the duration of system recovery. The size of time losses depends on the nature of the failure, the place of its occurrence, the organization of work to eliminate the consequences. Thus, the failure of the rolling stock at the station results in smaller losses than the failure arising on the stretch with the same rolling stock. The abnormal situation that appeared on the stretch of the double-track section, in general, will require fewer adjustments in the planned order of train passage than on the single-track section. Also, the duration of the restoration of the traffic management system depends on the category of the train delayed due to the failure. The article presents an original approach to describing the process of running circular block trains in the event of a failure, in which the train leaves the starting station with a delay. An algorithm for restoring the system of route reversal on a single-track section is presented, which describes the correction of the system and the result of the failure. The graph of the movement of trains in the coordinate system is depicted, which made it possible to estimate the deviations from the schedule of movement geometrically. Based on such an assessment, a mathematical model of a stable state of the system of running

circular block trains is proposed. The proposed description of the stability of the circular routes running, in the form of a model, will make it possible to estimate the train schedule depending on the magnitude of the delays of the described category of trains and the number of constant linear dependencies.

### Keywords

railway transport, ring route train, train schedule, deviations from the planning schedule, train delay, temporary losses

### For citation

Domozhirova A. D., Upry R. Yu. O vliyaniy zaderzhek marshrutnykh poezdov na vosstanovlenie grafika dvizheniya poezdov [On the influence of block train delays on the restoration of the train schedule]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 161–168. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).161-168

### Article Info

Received: 25.05.2021, Revised: 02.08.2021, Accepted: 15.09.2021

### Введение

Большую долю перевозимых грузов на железнодорожном транспорте составляют массовые навалочные и наливные, о чем свидетельствуют отчетные данные ОАО «РЖД» за последние два года (рис. 1).

На местах зарождения таких грузов целесообразнее организовывать вагоны в составы маршрутов, поскольку большой объем погрузки позволяет накапливать полновесные поезда. К тому же повышение маршрутизации перевозок – один из способов повышения производительности вагонов. Это связано с освобождением от переработки минимум одной технической станции, за счет чего повышается транзитность поездопотоков, увеличивается скорость передвижения вагонов.

Использование маршрутных поездов наиболее эффективно при строгом соблюдении «твердого» расписания [1–5].

Так же как и с другими категориями поездов, при курсировании маршрутов случаются

отказы (по причине выхода из работоспособного состояния технических средств, несоблюдения технологии работы, некорректной регулировки движения поездов оперативно-диспетчерским персоналом, из-за внешних факторов) [6–8].

Наибольшие последствия в связи с несоблюдением расписания движения поездов возникают на однопутных участках, так как на них выполняются запланированные скрещения с поездами различных категорий. И опоздание одного поезда может привести к нарушению графика движения поездов всего участка, причем продолжительность опоздания поезда с каждым перегоном растет [9–11].

В статье рассматривается процесс распространения временных последствий после опоздания маршрутного поезда и продолжительность восстановления графика движения поездов, а также описан алгоритм восстановления системы курсирования кольцевых маршрутных поездов и описание ее устойчивого состояния.

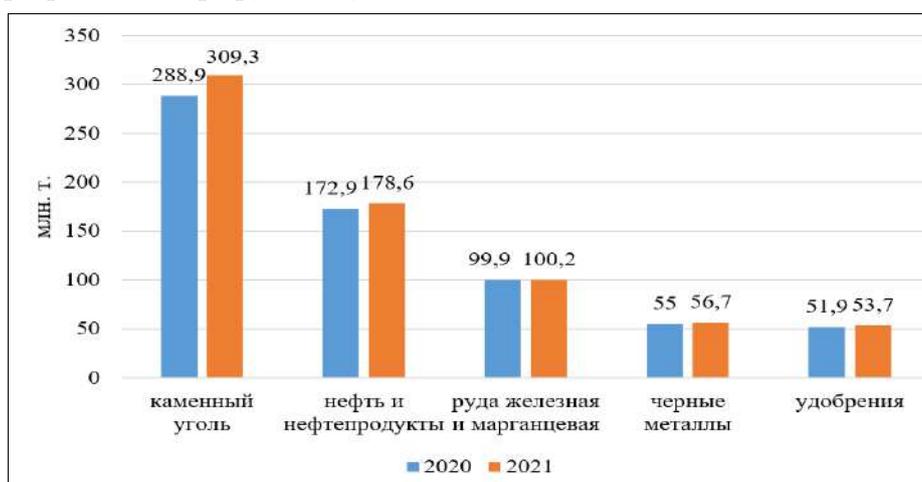


Рис. 1. Перевезенные грузы на железнодорожном транспорте за 2020 и 2021 гг.

Fig. 1. Goods transported by railway in 2020 and 2021

### Организация курсирования кольцевых маршрутных поездов

Наибольший эксплуатационный и экономический эффекты при строгом соблюдении графика движения поездов приносит обращение кольцевых маршрутных поездов [12–14]. Это организация курсирования постоянного состава поездов от станции погрузки до станции выгрузки и обратно. Такая система организации поездопотока имеет смысл при стабильных объемах погрузки на станциях отправления грузового маршрута.

Существует четыре схемы обращения кольцевых маршрутных поездов (рис. 2).

На схеме (см. рис. 2) *а* – обращение маршрутов между одной станцией погрузки и одной станцией выгрузки; *б* – курсирование между одной станцией погрузки и несколькими станциями выгрузки; *в* – курсирование между несколькими станциями погрузки и одной станцией выгрузки; *г* – обращение между двумя

и более станциями погрузки и выгрузки. Для исследования была выбрана схема *а*.

### Влияние выполнения графика движения на полновесность маршрутных поездов

Рассмотрим условный участок курсирования кольцевых маршрутных поездов между станцией погрузки № 6 и станцией выгрузки № 1. На участке работают пять пар кольцевых маршрутных поездов. Один и тот же локомотив обслуживает разные составы: привозит порожний состав на станцию № 6, увозит грузеный состав на станцию № 1 (рис. 3).

Готовность полносоставного поезда к отправлению на ограничивающих участок станциях обращения маршрутов может наступить не всегда вовремя, по графику. Это может быть связано с техническими отказами, срывами грузовых операций, неприемом маршрутов промышленными станциями и т. д. Тогда оперативно-диспетчерский персонал, опираясь на имею-

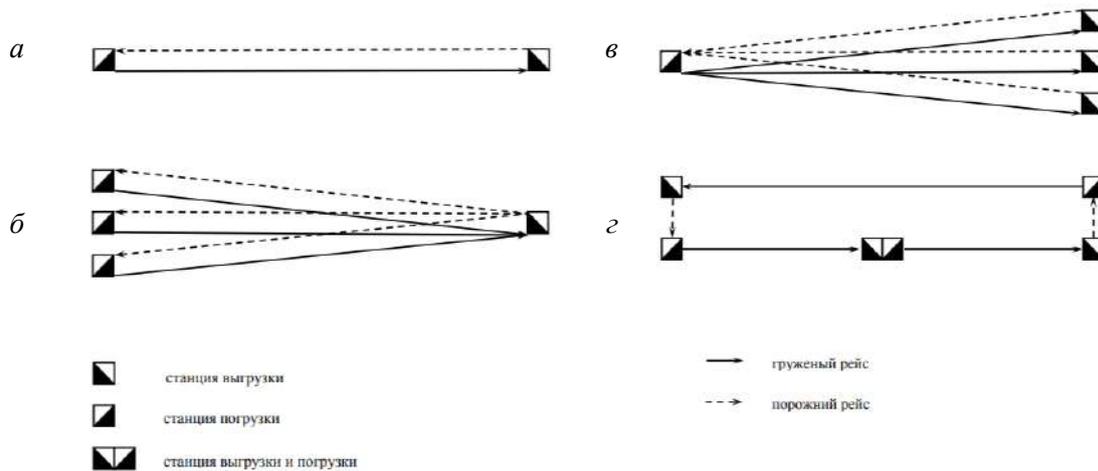


Рис. 2. Типовые схемы обращения кольцевых маршрутных поездов

Fig. 2. Turnover schemes of block trains

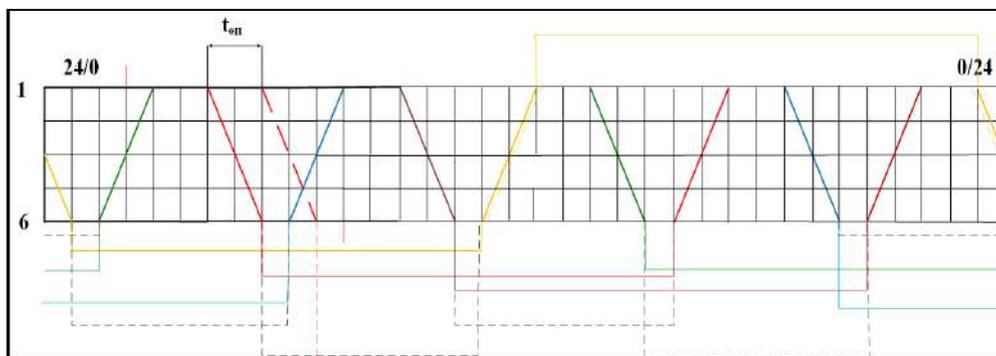


Рис. 3. График оборота составов и локомотивов маршрутных поездов

Fig. 3. Schedule of turnover of trains and locomotives of block trains

щиеся актуальные приказы и распоряжения, принимает решение о вариантах отправления. К примеру, при готовности к отправлению со станции № 1 порожнего состава с опозданием  $t_{оп}$  локомотив, привезший порожние вагоны (обозначенные красным цветом), может отправиться по графику, но тогда без вагонов – резервом, либо с полным составом, но с опозданием.

Рассмотрим последствия, которые могут возникнуть при двух описанных вариантах.

Если локомотив отправится со станции № 6 по графику, но без вагонов, тогда маршруту, обозначенному желтым цветом на станции № 1 не найдется вагонов, и локомотив поедет резервом. Если поезд отправится со станции № 6 полновесный, но с опозданием, тогда при отправлении маршрута, обозначенного желтым цветом, диспетчерский персонал вновь столкнется с выбором: график или вес?

### Восстановление графика движения поездов

В качестве объекта исследования выбран однопутный участок, в пределах которого курсируют пять пар кольцевых маршрутных поездов (один из пары – груженный, другой – порожний). Рассмотрим случаи, когда один из пяти порожних маршрутов отправляется с опозданием. Возникают принципиально разные исходы, в зависимости от опоздания: поездной диспетчер не забирает поезд (отменяет отправление), либо принимает отправление с опозданием.

Продолжительность восстановления графика движения зависит от продолжительности опоздания:

$$t_{он} \leq t_{пр.гр.м.ст.2} - t_{пр.пор.м.ст.2} - \tau_{ин} \Rightarrow T_{восст} = t'_{он}, \quad (1)$$

$$t_{он} \leq t_{пр.пас.неч.ст.2} - t_{пр.пор.м.ст.2} - \tau_{ин} \Rightarrow T_{восст} = 2t'_{он}, \quad (2)$$

где  $t_{он}$  – продолжительность опоздания при отправлении со станции № 1;  $t_{пр.гр.м.ст.2}$  – время

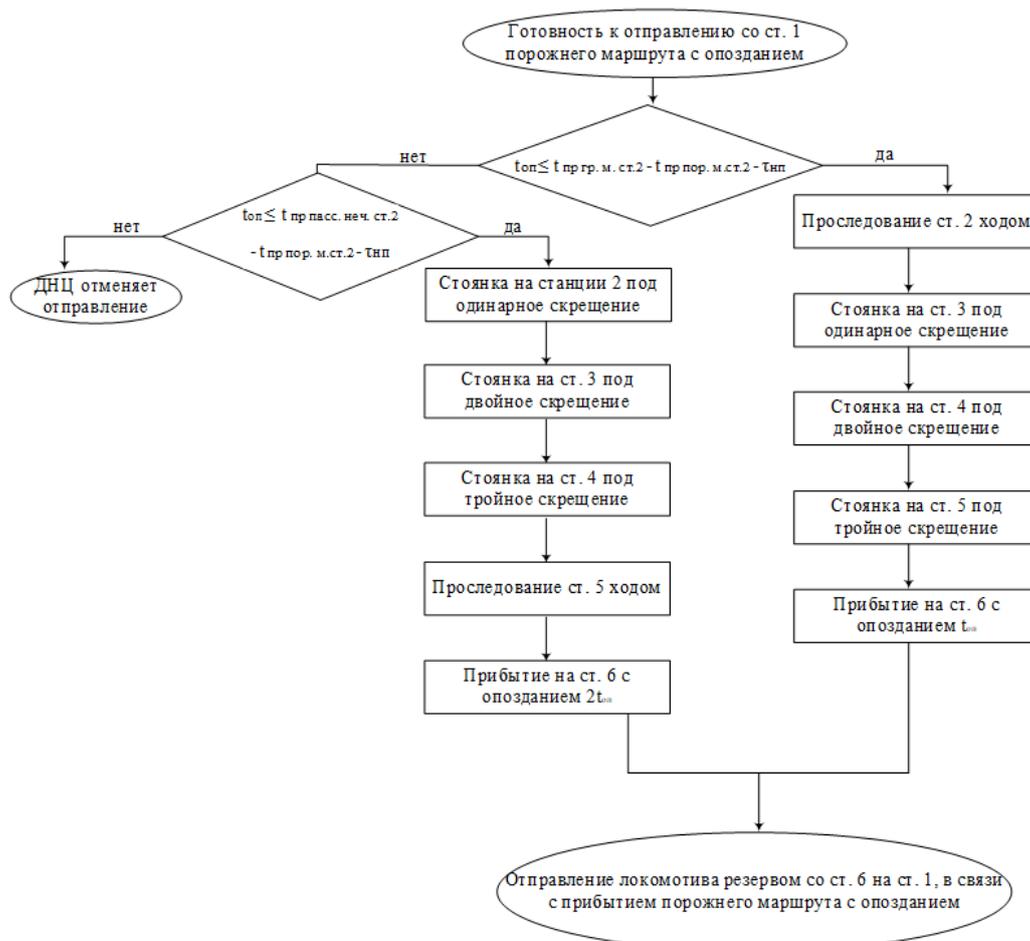


Рис. 4. Алгоритм восстановления графика движения маршрутных поездов на однопутном участке  
Fig. 4. Algorithm for restoring the schedule of block trains on a single-track section

прибытия грузового маршрута на станцию № 2;  $t_{np.nop.m.cm.2}$  – время прибытия порожнего маршрута на станцию № 2;  $\tau_{ин}$  – интервал одновременного прибытия;  $T_{восст}$  – продолжительность восстановления графика движения поездов;  $t'_{он}$  – продолжительность опоздания при прибытии на станцию № 6 [15–18].

Стоит заметить, что итог в обоих случаях (1) и (2) один – отправление по графику не полносоставного поезда, а локомотива без вагонов (резервом). Тогда, если представлять график движения маршрутных поездов в качестве системы курсирования кольцевых маршрутов, эта система восстановится при таком исходе лишь по параметру «время». Алгоритм восстановления графика движения поездов представлен на рис. 4.

Таким образом, для первого в новых сутках порожнего поезда вагонов не будет, и локомотив поедет резервом забирать со станции № 6 оставленные груженные вагоны. Для восстановления системы по параметру «вес» потребуются сутки.

### Описание системы обращения кольцевых маршрутов с учетом отклонений

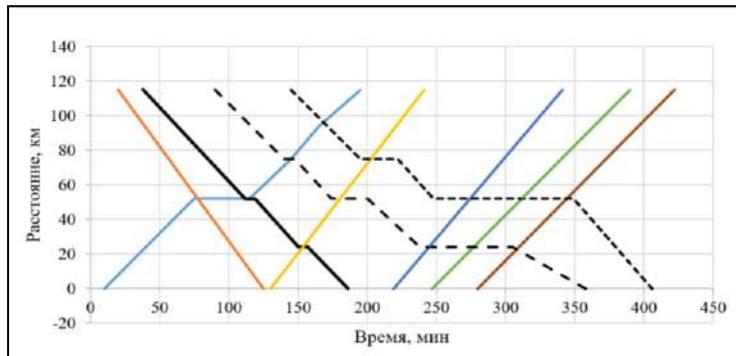
На рис. 5 представлен график движения поездов на однопутном участке в системе координат  $x$ ;  $y$ . Черными линиями обозначены: сплошная – графиковая нитка маршрута, штриховая – первый вариант прокладки маршрута с опозданием  $t_{он} \leq 60$  мин., пунктирная черная линия – вариант 2 прокладки маршрута с опозданием  $60 \text{ мин} < t_{он} \leq 120$  мин., остальными цветными линиями обозначены нитки пассажирских и графиковых поездов, которые являются неизменными и не могут сдвигаться по оси  $y$ .

В представленной системе нитки пассажирских и графиковых поездов, которые нельзя изменять (останавливать под скрещения).

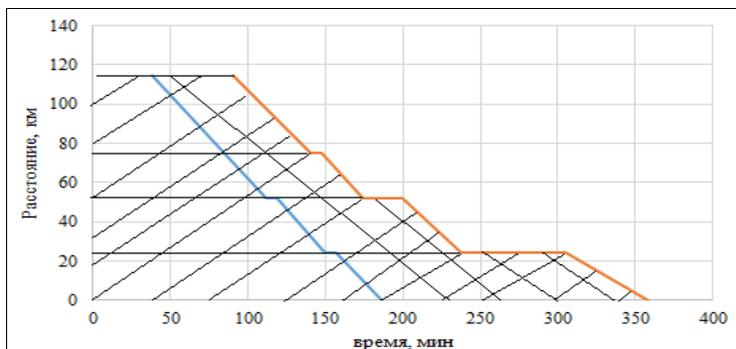
Тогда отклонение от графика можно выразить через площадь фигуры (рис. 6), представляющей множество параллелограммов (3):

$$S = \sum_{i=1}^n a_i h_i, \quad (3)$$

где  $i$  – количество перегонов на участке опоз-



**Рис. 5.** Изображение графика движения поездов на однопутном участке в системе координат  $(x; y)$   
**Fig. 5.** Image of the train traffic graph on a single-track section in the coordinate system  $(x; y)$



**Рис. 6.** Площадь фигуры, описывающей отклонение от графика (синий цвет – график, оранжевый – нитка при отправлении с опозданием на однопутном участке)  
**Fig. 6.** The area of the figure describing the deviation from the graph (blue – graph, orange – thread when departing late on a single-track section)



9. Шапкин И.Н., Кожанов Е.М. Технология обеспечения полновесности и полносоставности поездов, отправляемых по твердым ниткам графика // Вестник ВНИИЖТ. 2005. № 4. С. 5–7.
10. Мышкин И.И., Маловецкая Е.В. Организация эксплуатационной работы по твердым ниткам графика в увязке с локомотивным парком // Инфраструктура и эксплуатация наземного транспорта: материалы Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1. Нижний Новгород, 10 апреля 2019 г. Нижний Новгород: НИЦ «21 век», 2019. С. 202–208.
11. Панин В.В., Колесникова Е.С. Маршрутизация перевозок грузов на сети железных дорог ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2011. № 2. С. 34–39.
12. Кужель А.Л., Шапкин И.Н., Вдовин А.Н. Сквозные технологии маршрутизации грузовых перевозок // Железнодорожный транспорт. 2015. № 7. С. 14–19.
13. Бессоненко С.А., Жарикова Л.С. О вопросе рационального определения нормативных сроков доставки грузов железнодорожным транспортом // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 4. С. 19–22.
14. Юрина О.П., Танайно Ю.А., Жарикова Л.С. Эффективность маршрутизации грузовых перевозок // Железнодорожный транспорт. 2020. № 6. С. 14–18.
15. Александров А.Э., Шипулин А.В. Использование имитационной системы Истра для моделирования графика движения поездов // Транспорт Урала. 2011. № 4. С. 67–71.
16. Шаров В.А., Бородин А.Ф. Интегрированная технология управления движением грузовых поездов по расписанию // Железнодорожный транспорт. 2011. № 8. С. 11–21.
17. Перцов Д.Л. Маршрутизация лесных грузов // Вестник ВНИИЖТ. 1986. № 2. С. 9–12.
18. Сотников Е.А. Нормирование размеров неснижаемого резерва локомотивов на станциях их оборота // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 1. С. 3–8.

### References

1. Domojrova A.D. Upry R.Yu. Povyshenie stabil'nosti kursirovaniya kol'cevyykh marshrutnykh poezdov [Increasing the stability of round route trains]. *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2021, No. 1.
2. Tsaregorodtseva E.Yu. Upry R.Yu. Innovatsionnyye podkhody v upravlenii logistikoy na transporte [Innovative approaches in transport logistics management]. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona* [Transport of the Asia-Pacific region]. 2021, No. 1, pp. 14–17.
3. Malovetskaya E.V. et al. Planning of qualitative indexes of railroad operational work in polygon technologies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020, No. 1. 012041 p.
4. Gilmanov A.I., Dorogaikina E.V., Zalogova O.I. Issledovanie faktorov, vliyayushchikh na prostoy tranzitnykh vagonov s pererabotkoy na sortirovochnykh stancyakh [Study of the factors affecting inactivity of transit cars with processing on the leading yard]. *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal]. 2019, No. 1.
5. Alexandrov A.E., Kovalev I.A. Postroyeniye avtomatizirovannogo protsessa upravleniya obrashcheniyem kol'tsevyykh marshrutov [Design of automated control process for circular routes]. *Transport Urala* [Transport of Ural]. 2007, No. 1, pp. 41–47.
6. Alexandrov A.E., Timukhina E.N., Kovalev I.A. Optimizatsionnaya model' perevochnogo protsessa s ispol'zovaniyem kol'tsevyykh marshrutov [Optimization model of the transportation process with the use of unit trains]. *Transport Urala* [Transport of Ural]. 2017, No. 4, pp. 36–39.
7. Apattsev V.I., Sharov V.A. K realizatsii kompleksnoy programmy poetapnogo perekhoda na organizatsiyu dvizheniya грузовых поездов po raspisaniyu na rossiyskikh zheleznykh dorogakh [Towards the implementation of a comprehensive program for a phased transition to organizing the movement of freight trains on a schedule on Russian railways]. *Nauka i tekhnika transporta* [Transport science and Technology]. 2011, No. 3, pp. 69–72.
8. Davydov A.A. Organizatsiya vagonopotokov i marshrutizatsiya перевозок pri perekhode na poligonnyye tekhnologii ekspluatatsionnoy raboty [Organization of car flows and routing of transportation during the transition to landscape technologies of operational work]. *Zakonomernosti razvitiya tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh nauk: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials of the International Scientific and Practical Conference «Patterns of development of technical and technological sciences»]. Kazan', 2017, pp. 15–18.
9. Shapkin I.N., Kozhanov Ye.M. Tekhnologiya obespecheniya polnovesnosti i polnosostavnosti поездов, otpravlyayemykh po tverdyim nitkam grafika [Technology of ensuring the full-weight and complete composition of trains sent on fixed lines of the schedule]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZHT]. 2005, No. 4, pp. 5–7.
10. Myshkin I.I., Malovetskaya Ye.V. Organizatsiya ekspluatatsionnoy raboty po tverdyim nitkam grafika v uvязke s lokomotivnym parkom [Organization of operating work on solid threads of graphics tied to the locomotive park]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Infrastruktura i ekspluatatsiya nazemnogo transporta: v 2 chastyakh* [Materials of the international scientific and practical conference «Infrastructure and operation of ground transport»: in 2 parts]. Nizhnij Novgorod, 2019, vol. 1, pp. 202–208.
11. Panin V.V., Kolesnikova Ye.S. Marshrutizatsiya перевозок грузов na seti zheleznykh dorog ОАО «RZHD» [Routing of cargo transportation on the railway network of JSC «Russian Railways»]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2011, No. 2, pp. 34–39.
12. Kuzhel' A.L., Shapkin I.N., Vdovin A.N. Skvoznyye tekhnologii marshrutizatsii грузовых перевозок [End-to-end technologies for routing freight traffic]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2015, No. 7, pp. 14–19.
13. Bessonenko S.A., Zharikova L.S. O voprose ratsional'nogo opredeleniya normativnykh srokov dostavki грузов zheleznodorozhnym transportom [On the Issue of Rational Determination of the Normative Terms for the Delivery of Goods by

Rail]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East]. 2015, No. 4, pp. 19–22.

14. Yugrina O.P., Tanayno Yu.A., Zharikova L.S. Effektivnost' marshrutizatsii gruzovykh poyezdov [Efficiency of routing of cargo transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2020, No. 6, pp. 14–18.

15. Aleksandrov A.E., Shipulin A.V. Ispol'zovaniye imitatsionnoy sistemy Istra dlya modelirovaniya grafika dvizheniya poyezdov [Using the Istra simulation system to simulate train schedules]. *Transport Urala* [Transport of Ural]. 2011, No. 4, pp. 67–71.

16. Sharov V.A., Borodin A.F. Integrirovannaya tekhnologiya upravleniya dvizheniyem gruzovykh poyezdov po raspisaniyu [Integrated technology for controlling the movement of freight trains according to the schedule]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2011, No. 8, pp. 11–21.

17. Pertsov D.L. Marshrutizatsiya lesnykh gruzov [Routing of forest cargo]. *Vestnik VNIIZHT* [Bulletin of VNIIZHT]. 1986, No. 2, pp. 9–12.

18. Sotnikov Ye.A. Normirovaniye razmerov nesnizhayemogo rezerva lokomotivov na stantsiyakh ikh oborota [Rationing of the size of the irreducible reserve of locomotives at the stations of their turnover]. *Vestnik VNIIZHT* [Bulletin of VNIIZHT]. 2020, vol. 79, No. 1, pp. 3–8.

### Информация об авторах

**Доможирова Алена Дмитриевна** – аспирант кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: domojirova.a@gmail.com.

**Упырь Роман Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: upyr.roman@gmail.com.

### Information about the authors

**Alena D. Domojirova** – Post-Graduate Student of the Department of Operational Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: domojirova.a@gmail.com.

**Roman Yu. Upyr** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Operational Management, Irkutsk State Transport University, email: upyr.roman@gmail.com.

## Прогнозные значения обращений по наиболее прогрессивным каналам привлечения клиентов с учетом влияния транспортного рынка

Н. В. Власова✉, В. А. Оленцевич, Н. П. Асташков

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

✉ natalya.vlasova.76@list.ru

### Резюме

Современное развитие экономических связей не только внутри страны, но и внешних, требует от ОАО «Российские железные дороги» значительного повышения качества обслуживания грузовладельцев. Существующий формат транспортного рынка способствует развитию контейнерных перевозок и появлению высокотехнологичных логистических центров в крупных транспортных узлах, автоматизации и информатизации транспортных терминалов, созданию современной погрузо-выгрузочной инфраструктуры. Поиск новых способов повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта, привлечение новых объемов грузов определило выбор темы научного исследования. Разработка современных клиентоориентированных методов и подходов к организации работы железнодорожных центров предоставления транспортных услуг при падении доли погрузки высокодоходного сектора перевозок стоит достаточно остро. Согласно проведенному научному исследованию существует вероятность, что высокодоходный сегмент грузов, перевозимых железнодорожным транспортом, может «покинуть» отрасль при условии отсутствия срочности применения мероприятий, способствующих их оттоку на автомобильный транспорт. В связи с чем борьба за высокодоходный груз для компании ОАО «Российские железные дороги» становится принципиально важной задачей. В представленной статье авторами произведен анализ показателей работы Восточно-Сибирского центра оказания услуг по классам перевозимых грузов, сделан вывод о недостаточной эффективности работы подразделения. Данное заключение основано на выявленном факторе значительного падения объемов перевозок по многим позициям высокодоходных грузов. С целью повышения уровня качества предоставляемых услуг проведено построение схемы взаимодействия с бизнес-единицами транспортно-логистического бизнес-блока. Для оптимизации существующих и поиска новых каналов привлечения клиентов представлены эффективные формы взаимодействия с клиентами, ориентированные на получение дополнительного объема дохода и прибыли ОАО «Российские железные дороги». Составлен прогноз обращений по наиболее прогрессивным, по мнению авторов статьи, каналам привлечения клиентов с учетом влияния транспортного рынка, что позволит повысить уровень привлекательности данного сервиса.

### Ключевые слова

центр предоставления услуг, прогноз обращений, классы грузов, падение объемов позиций высокодоходных грузов, уровень привлекательности сервиса, конкурентная борьба за грузоотправителей, транспортно-логистические продукты и услуги, схема по реализации активных продаж, ключевые показатели оценки результативности работы

### Для цитирования

Власова Н. В. Прогнозные значения обращений по наиболее прогрессивным каналам привлечения клиентов с учетом влияния транспортного рынка / Н. В. Власова, В. А. Оленцевич, Н. П. Асташков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 169–178. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).169-178

### Информация о статье

поступила в редакцию: 15.09.2021, поступила после рецензирования: 11.10.2021, принята к публикации: 18.10.2021

## Forecast values of requests for the most progressive channels of attracting customers, taking into account the influence of the transport market

N. V. Vlasova✉, V. A. Olencevich, N. P. Astashkov

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

✉ natalya.vlasova.76@list.ru

### Abstract

The modern development of economic relations not only within the country, but also externally, requires JSC "Russian Railways" to significantly improve the quality of service to cargo owners. The existing format of the transport market contributes to the development of container transportation and the emergence of high-tech logistics centers in large transport hubs, automation and informatization of transport terminals, the creation of modern loading and unloading infrastructure. The search for new ways to increase the competitiveness of railway transport, the attraction of new volumes of cargo determined the choice of the topic of the scientific research. The development of modern client-oriented methods and approaches to the organization of the work of railway centers for the provision of transport services with a drop in the share of loading of the highly profitable transportation

sector is quite acute. According to the conducted scientific research, there is a possibility that the highly profitable segment of goods transported by rail may "leave" the industry, provided that there is no urgency in applying measures that contribute to their outflow to road transport. In this connection, the struggle for high-yield cargo for JSC "Russian Railways" becomes a fundamentally important task. In the presented article, the authors analyzed the performance indicators of the Armed Forces of the center for the provision of services by classes of transported goods, concluded that the unit's performance was insufficient. This conclusion is based on the identified factor of a significant drop in traffic volumes for many high-yield cargo items. In order to improve the quality of services provided, a scheme of interaction with the business units of the transport and logistics business unit was built. To optimize the existing channels of attracting customers, and search for the new ones, effective forms of interaction with customers focused on obtaining additional revenue and profit of JSC "Russian Railways" are presented. The forecast of appeals was created for the most progressive, according to the authors of the article, channels of attracting customers, taking into account the influence of the transport market, which will increase the level of attractiveness of this service.

### Keywords

the center for the provision of services, the forecast of appeals, cargo classes, the drop in the volume of high-yield cargo positions, the level of attractiveness of the service, competition for shippers, transport and logistics products and services, the scheme for the implementation of active sales, key performance evaluation indicators

### For citation

Vlasova N. V., Olencevich V. A., Astashkov N. P. Prognoznye znacheniya obrashchenii po naibolee progressivnym kanalim privlecheniya klientov s uchedom vliyaniya transportnogo rynka [Forecast values of requests for the most progressive channels of attracting customers, taking into account the influence of the transport market]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 4 (72), pp. 169–178. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).169-178

### Article Info

Received: 15.09.2021, Revised: 11.10.2021, Accepted: 18.10.2021

### Введение

На последние годы вопрос о падении погрузки на сети в ОАО «Российские железные дороги» («РЖД») позиций высокодоходных грузов стоит достаточно остро. Согласно проведенного научного исследования существует вероятность, что высокодоходный сегмент грузов, перевозимых железнодорожным транспортом могут «покинуть» отрасль, если в срочном порядке не будут приняты меры по их оттоку на автомобильный транспорт. Необходимо отметить, что борьба за высокодоходный груз для компании ОАО «РЖД» становится принципиальной [1–3].

В качестве основных факторов, оказывающих влияние на суммарный объем погрузки грузов различных категорий, целесообразно рассмотреть следующие:

- острая конкурентная борьба между видами транспорта;
- текущее положение дел не только на внутренних, но и на внешних товарных рынках;
- мировая, а также внутрироссийская экономическая и политическая обстановки.

Однако основной проблемой была и остается межвидовая конкуренция различных видов транспорта. Ужесточается конкуренция и с автомобильным транспортом, который успешно предоставляет доставку по типу door-to-door, обеспечивает высокое качество сервис-

ного обслуживания и дополнительных услуг, имеет высокую возможность оперативно менять стоимость перевозки 1 т груза в зависимости от рыночной обстановки. При этом железные дороги, напротив, существенно ограничены государственным регулированием уровня тарифов, набором сопутствующих услуг, а также системой календарного планирования объемов перевозок. Кроме того, во многом из-за наличия множества собственников вагонов снижается технологическая устойчивость железнодорожного транспорта. Все эти факторы способствуют уходу грузов на автомобили.

### Основные недостатки транспортно-экспедиционного обслуживания, оказывающие влияние на изменение показателей транспортных услуг центра фирменного транспортного обслуживания

Усиливается конкуренция малых и средних автотранспортных предприятий и компаний разного уровня, отвлекающих на себя более мелких перевозчиков, требования которых к организации перевозочного процесса не слишком завышены, а также клиентов, которые являются для ОАО «РЖД» нетрадиционными или случайными. При этом прирост уровня рынка автоперевозок согласно [4] составляет 15–20 % в год.

В качестве недостатков в сфере транспортно-экспедиционного обслуживания, способствующих оттоку грузов из железнодорожной транспортной системы на прочие транспортные направления можно отметить понижение уровня качества предоставляемых транспортных услуг. Как самой перевозочной операции, так и сопутствующих ей услуг по погрузке, выгрузке, сортировке грузов в складском секторе, при подаче-уборке вагонного парка, оформлении документов и пр. В связи с чем, необходим постоянный мониторинг, глубокий анализ операций по доставке груз и качеству оказываемых перевозчиком услуг.

В настоящее время в ОАО «РЖД» проводится постоянный мониторинг погрузки грузов, относящихся к сектору высокодоходных. В первую очередь политика отрасли направлена на грузоотправителей различных по географическому положению, которые регулярно и в большом объеме предоставляют к перевозке грузы третьего класса. Ведется контроль удельного веса погрузки таких грузов по видам транспорта, в частности железнодорожного и автомобильного. В настоящее время ситуация по оттоку высокодоходных грузов достаточно критическая, но не безвозвратная, поскольку является в большей степени сезонной и осложняется создавшейся эпидемической обстановкой, что не дает возможности увидеть реальную картину.

Центры фирменного транспортного обслуживания (ЦФТО) сегодня ставят основной задачей своей деятельности реализацию комплекса мероприятий по сохранению имеющихся объемов высокодоходного сектора перевозок, а также максимальную политику по привлечению новых клиентов в данной сфере.

В качестве наиболее значимых недоработок в деятельности ЦФТО, в рамках транспортно-экспедиционного обслуживания, которые оказывают достаточно значимое влияние на ухудшение показателей деятельности, а также на уровень эффективности перевозочного процесса в целом по ОАО «РЖД» можно отметить:

– несовершенство действующего законодательства, несогласованность инфраструктуры на взаимодействующих видах транспорта в узлах, низкая эффективность документооборота способствуют увеличению сроков доставки грузов, сокращению провозной и пропускной

способности перевозчика, увеличению сроков хранения грузов на терминалах;

– ограниченное число терминалов, отсутствие всевозможных типов контейнеров для определенных видов грузов, ограниченная номенклатура контейнеропригодных грузов стимулирует грузовладельцев выбирать альтернативные виды транспорта (автомобильный, водный);

– высокая стоимость перевозок на «невыгодные» собственникам подвижного состава направления, отсутствие современных автоматизированных и механизированных терминалов, низкая сохранность вагонного парка повышают затраты грузовладельцев и снижают привлекательность железнодорожного транспорта.

Понятие «качество» описывается как основа для формирования конкуренции, подразумевающая прямую зависимость «качество – конкурентный статус предприятия». Иными словами, конкуренция на транспорте – это борьба за грузовладельца, которая вынуждает применять современные технологии, повышать скорость доставки грузов и пассажиров, повышать качество перевозок и их надежность [5–7].

Эффективный подход к процессу управления качеством предоставляемых услуг служит основой организации работы сервисных центров, включающих в себя и транспортно-экспедиционные услуги.

Пользователь железнодорожного транспорта имеет возможность оценить качество полученного сервиса только на конечном этапе самого процесса предоставления услуги, когда груз доставлен в пункт назначения, при этом рассматривается два основных параметра качества:

– техническое качество – то, что потребитель транспортной услуги получает при взаимодействии с сервисной фирмой;

– функциональное качество – то как потребитель получает услугу.

Оценка уровня качества транспортной услуги в этом случае производится в узком понятии только так, как его воспринимает грузовладелец.

С целью повышения уровня конкурентоспособности железнодорожной транспортной системы, возможности качественного роста сектора транспортно-экспедиционной деятельности необходимо объективное понимание качества оказываемых услуг [8, 9].

Основной задачей перевозчика является развитие инфраструктуры (создание резервов

производственных мощностей инфраструктуры) и усиление провозной и пропускной способности. Существенное ее ограничение происходит из-за бесплатных мест, в которые сегодня превращаются пути необщего пользования. Порожние вагоны могут находиться неопределенное время в ожидании наиболее выгодного груза на путях необщего пользования, тем самым загромождая инфраструктуру и уменьшая ее пропускную способность [10].

Не способствует привлечению грузовладельцев на железнодорожный транспорт слабое развитие железнодорожной инфраструктуры у грузополучателей и отсутствие доставки готовой продукции железнодорожным транспортом «от двери до двери» [11].

Ограниченное число железнодорожных терминалов неблагоприятно сказывается на перевозках, грузопоток уходит на автомобильный транспорт. Потеря времени и средств при прохождении подвижного состава в узлах происходит из-за несогласованности развития инфраструктуры на разных видах транспорта. Причинами несогласованности является отсутствие строительства современных автоматизированных и механизированных грузовых терминалов [12, 13].

Организация доставки «от двери до двери» все чаще сопровождается «точно в срок». Использование этого способа позволяет сокращать время выполнения заказа грузовладельца, снижает уровень запасов на складе и обеспечивает выполнение заказа к требуемому сроку. Если общее время доставки не отвечает требованиям клиента, то разрабатываются мероприятия по сокращению продолжительности отдельных элементов за счет технических и технологических изменений. В этом случае регулирование доставки может производиться на стадии планирования перевозки и в ходе транспортного процесса. Для обеспечения доставки груза по принципу «точно в срок» необходимо отслеживание перемещения груза и в некоторых случаях применение управляющих воздействий на технические и технологические параметры. К ним относятся: перерабатывающая способность, вместимость складов, грузовых фронтов, приемоотправочных и сортировочных путей, маневровых средств, провозная способность участков магистрального транспорта [14].

Установленный документально на железнодорожном транспорте норматив на сроки доставки перевозимых грузов сегодня не в полной мере соответствует представлениям пользователей транспортных услуг о срочности доставки, поскольку все транспортные процедуры давно перетерпели процесс ускорения. Заключаемое с клиентом дополнительное соглашение, способствующее «ускорению доставки», предусматривающее взимание сверх тарифа на перевозку, лишь снижает привлекательность отрасли.

В качестве негативного момента следует отметить непредсказуемость фактических сроков доставки грузов, что особенно отрицательно влияет на имидж ОАО «РЖД» при переходе с железнодорожного транспорта на водный ресурс. В данном случае любая временная задержка приведет к денежному возмещению убытка, поскольку товароприобретатели предполагают поставки в установленные договором сроки, а иначе расторгают договор [15].

С целью прироста уровня конкурентоспособности Транссибирской магистрали, которая сегодня является основополагающей структурой Восточного полигона, разработаны и успешно реализуются графики движения поездов по ускоренным ниткам. Действует упрощенный порядок декларирования перевозимых контейнерных поездов, что позволило минимизировать время оформления таможенных документов до 4,5 ч. Необходимо привлечь крупных национальных операторов, в задачи которых должно входить предоставление конкурентоспособных ставок, создание благоприятного инвестиционного климата, обеспечение стандартного уровня сервиса на всем маршруте, снижение рисков, привлечение к перевозкам контейнерного парка иностранных владельцев.

### **Анализ объемных показателей работы Восточно-Сибирского территориального центра услуг по классам грузов**

Результатом деятельности Восточно-Сибирского территориального центра фирменного транспортного обслуживания (далее – ВС центр услуг) являются количество совершаемых экспедиционных операций, а также предоставление информационных и иных видов услуг, в границах Восточно-Сибирской железной дороги. Позитивную динамику работы ВС центра услуг обеспечивает организация пере-

возки сырьевых грузов, прежде всего угольных, высокие объемы погрузки которых не приносят ощутимых финансовых результатов. Необходимо отметить, что данная категория груза относится к грузам первого класса, которые для ОАО «РЖД» являются низкодоходными: каменный уголь, торф и торфяная продукция, сланцы горючие, флюсы, руда железная и марганцевая, руда цветная и сырное сырье, строительные грузы, промышленное сырье, гранулированные шлаки, огнеупоры, цемент и лесные грузы [7, 16, 17].

Категории грузов, отнесенных к третьему классу и являющихся высокодоходными, в последние периоды времени значительно сокращаются. Это такие грузы, как черные металлы, машины и оборудование, металлические конструкции, метизы, автомобили, цветные металлы, изделия из них, химикаты и сода, рыба, хлопок, бумага и др.

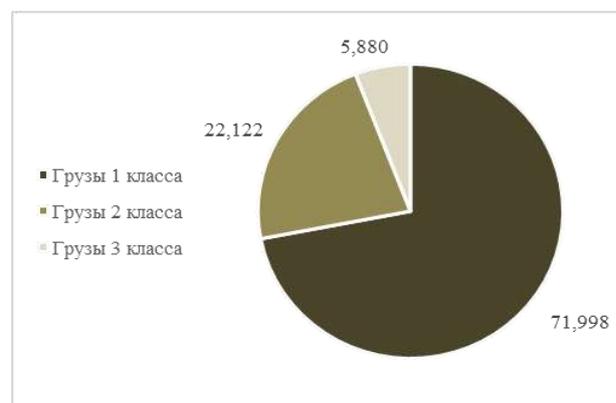
Общая динамика погрузки носит негативный характер по всем категориям грузов, за исключением грузов второго класса – среднедоходных, таких как нефть и нефтепродукты, сельскохозяйственные машины, химические и минеральные удобрения, сахар, мясо и масло животное, картофель, овощи и фрукты, соль поваренная, остальные продовольственные грузы, промышленные товары народного потребления, сахарная свекла и семена, зерно, продукты перемола, комбикорма, жирность, жмыхи и др. Прирост погрузки которых составил 6,2 % в течение текущего периода.

Динамика погрузки грузов первого и третьего класса является отрицательной и составляет –10 и 7,5 % соответственно.

Максимальная доля перевозки приходится на грузы первого класса, являющиеся низкодоходными, при этом их доля упала с 74,64 до 71,99 %. Грузы второго класса (среднедоходные) показали прирост с 19,42 до 22,12 %, в то время как грузы третьего класса (высокодоходные) имеют незначительное падение 0,1 %, (рис. 1).

Грузы первого класса перевозятся по тарифам ниже себестоимости, второго класса – на уровне себестоимости, транспортировка грузов третьего класса как раз и обеспечивает ОАО «РЖД» основной объем прибыли, покрывая убытки от работы с первыми двумя классами [7, 9, 18].

В рамках конкурентной борьбы за грузоотправителей на коротких и средних плечах доставки, железнодорожный транспорт теряет свои позиции. Основной процент высокодоходных грузов перевозится автомобильным транспортом [1–5, 19–22].

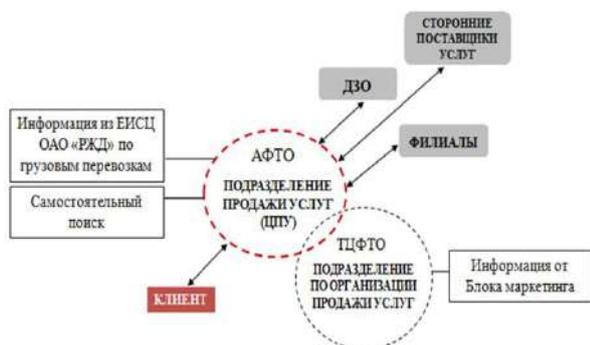


**Рис. 1.** Структура перевозимых грузов по классам  
**Fig. 1.** The transported freight structure according to classes

Проанализировав показатели работы ВС центра услуг по классам грузов, авторы пришли к выводу о недостаточной эффективности работе центра. Данное заключение основывается на выявленном факторе значительного падения объемов перевозок по многим позициям высокодоходных грузов. Отрицательная динамика негативно сказывается на конечном объеме итоговой выручки ВС центра услуг и является основной причиной понижения эффективности работы отрасли в целом.

### **Прогнозные значения обращений по наиболее прогрессивным каналам привлечения клиентов с учетом влияния транспортного рынка**

Комплексным сопровождением клиентов на Восточном полигоне железных дорог, осуществлением активных продаж и удовлетворением потребностей потенциальных клиентов в транспортно-логистических продуктах и услугах занимается Центр продажи услуг (далее – ЦПУ). ЦПУ реализует Концепцию клиентоориентированности холдинга «РЖД» в сфере обеспечения грузовых перевозок [9]. Основной функцией ЦПУ являются активные продажи, функциональная схема по реализации, которых представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Функциональная схема по реализации активных продаж

**Fig. 2.** Functional scheme for making active sales

Основные этапы осуществления активных продаж включают:

– поиск новых и ранее ушедших с железнодорожного транспорта клиентов в регионе обслуживания;

– сбор актуальной информации о деятельности и потребностях потенциальных клиентов из информационных систем ОАО «РЖД» и открытых источников совместно с работниками подразделений мониторинга и маркетинга рынка грузовых перевозок Территориальных центров фирменного транспортного обслуживания (ТЦФТО), подразделений транспортного обслуживания и мониторинга рынка грузовых перевозок АФТО;

– осуществление холодных звонков по-

тенциальным клиентам;

– выявление и анализ потребностей потенциальных клиентов в транспортно-логистических продуктах и услугах;

– согласование с исполнителями услуг, условий их предоставления потенциальным клиентам;

– разработка и направление коммерческих предложений потенциальным клиентам;

– организация деловых встреч и проведение переговоров с потенциальными клиентами;

– подготовка и направление / демонстрация презентационных материалов потенциальным клиентам;

– участие в отраслевых / имиджевых коммуникационных мероприятиях в целях продвижения услуг холдинга «РЖД»;

– участие в подготовке проектов договоров с клиентами на оказание транспортно-логистических услуг на условиях, максимально удовлетворяющих потребности клиентов с учетом технических и технологических возможностей холдинга «РЖД» [9, 13, 23–25].

Деятельность ЦПУ оценивается по следующему перечню ключевых показателей оценки результативности работы:

– динамика выручки, начисленной по оказанным услугам в рамках договоров, заключенных с участием работников ЦПУ;

– отсутствие жалоб клиентов, претензий на некачественное обслуживание.



**Рис. 3.** Предлагаемая схема взаимодействия с бизнес-единицами транспортно-логистического бизнес-блока Восточно-Сибирского территориального центра фирменного транспортного обслуживания

**Fig. 3.** The proposed scheme of interaction with business units of transport-logistics business block of East Siberian regional transportation service

За рассматриваемый период ЦПУ обработано более 24,9 тыс. обращений, связанных с организацией перевозки грузов, заключено более 1,3 тыс. договоров на оказание различных транспортно-логистических услуг, более 370 вагонов поданы грузоотправителям для осуществления перевозок в рамках агентского договора на предоставление подвижного состава, привлечено 209 новых клиентов. В рамках договора на комплексное транспортное обслуживание перевезено 10 601 вагон / контейнер или 658,4 тыс. т груза. В рамках данного договора клиент получает комплекс необходимых для осуществления перевозки услуг:

- погрузочные, выгрузочные и сортировочные операции;

- складирование и хранение предъявляемых к перевозке грузовых мест на территориях, относящихся к общему пользованию на железнодорожных станциях, а также на открытых площадках и в крытых складах;

- предоставление финансового интереса пользователя услугами железнодорожного транспорта в сфере деятельности ОАО «РЖД» согласно выданной доверенности, включая оформление заявки на перевозку груза и первичной документации;

- транспортная услуга «мастер погрузки».

Поступило более 3,3 обращений, из них на линию ФОКУС ВС центр услуг 326 обращений. Основная доля их них (74 %) приходится

на обращения по группе вопросов «Оформление перевозочных документов». Количество обращений, которые не являются жалобами, составило 1 342 обращения. Больше количество обращений (35 %) по теме «Перевозка грузов и порожних вагонов». Вторая по величине (19 %) группа вопросов «Цифровые сервисы и информационные услуги».

С целью повышения уровня качества предоставляемых услуг, авторами проведено построение схемы взаимодействия с бизнес-единицами транспортно-логистического бизнес-блока (рис. 3). Конверсия продаж в данном случае – это отношение покупателей, воспользовавшихся услугами к потенциальным покупателям, которые не воспользовались услугами. В сегменте B2B уровень конверсии продаж считается удовлетворительным в диапазоне 7–13 %.

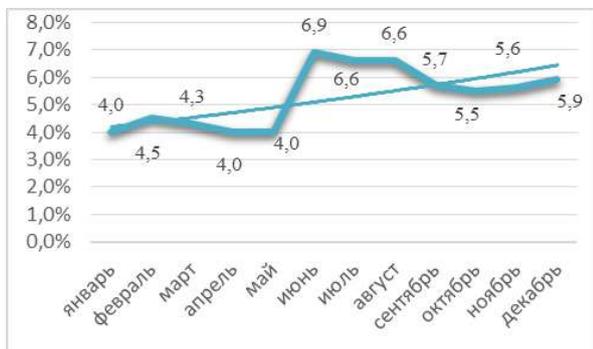
Проведен анализ схемы взаимодействия, который позволил выявить «слабые» места в работе ВС центра услуг.

В рамках оптимизации существующих и поиска новых каналов привлечения клиентов ЦПУ целесообразно создание эффективных форм, ориентированных на получение дополнительного объема дохода и прибыли ВС центра услуг. Прогноз обращений по наиболее прогрессивным, по мнению авторов статьи, каналам привлечения клиентов с учетом влияния транспортного рынка представлен в табл.

Прогнозные значения обращений по наиболее прогрессивным каналам привлечения клиентов с учетом влияния транспортного рынка  
Forecast values of requests for the most progressive channels for attracting customers taking into account the influence of the transport market

Месяц	Канал привлечения				Общий итог
	Интернет / личный кабинет	Рекомендация другого клиента	Перенаправление из другого подразделения	По обращению в ЦПУ, маркетинговые исследования	
Январь	2	5	5	1	<b>13</b>
Февраль	3	5	4	6	<b>18</b>
Март	3	14	7	3	<b>27</b>
Апрель	1	14	12	5	<b>32</b>
Май	–	9	1	6	<b>16</b>
Июнь	1	9	–	9	<b>19</b>
Июль	1	15	6	1	<b>23</b>
Август	–	7	5	14	<b>26</b>
Сентябрь	–	6	–	16	<b>22</b>
Октябрь	1	3	5	5	<b>14</b>
Ноябрь	1	5	4	6	<b>16</b>
Декабрь	2	8	3	9	<b>22</b>
<b>Итого</b>	<b>15</b>	<b>100</b>	<b>52</b>	<b>81</b>	<b>248</b>

Анализ таблицы прогнозных значений на 2022 г. позволяет сделать выводы о повышении уровня привлекательности данного сервиса, что подтверждает прирост уровня доходности (рис. 4).



**Рис. 4.** Динамика доли доходов от оказания дополнительных услуг

**Fig. 4.** Dynamics of the share of income from the provision of additional services

### Заключение

Последние годы в ОАО «РЖД» наблюдается процесс падения объемов высокодоходных грузов, грузов, отнесенных к третьему классу. При этом на грузы первого класса, которые, согласно затратам на перевозку, относятся к категории низкодоходных, приходится минимальный удельный вес. Вопрос о падении погрузки позиций высокодоходных грузов стоит достаточно остро. Согласно проведенного научного исследования существует вероятность, что высокодоходный сегмент грузов, перевозимых железнодорожным транспортом

«могут покинуть» отрасль, если не остановить их отток на автомобильный транспорт.

Необходимо отметить, что борьба за высокодоходный груз для компании ОАО «РЖД» становится принципиальной.

Проанализировав показатели работы ВС центра услуг по классам грузов, авторы пришли к выводу о недостаточной эффективности работе центра. Данное заключение основывается на выявленном факторе значительного падения объемов перевозок по многим позициям высокодоходных грузов. Отрицательная динамика негативно сказывается на конечном объеме итоговой выручки ВС центра услуг и является основной причиной понижения эффективности работы отрасли в целом.

С целью повышения уровня качества предоставляемых услуг, проведено построение схемы взаимодействия с бизнес-единицами транспортно-логистического бизнес-блока. Для оптимизации существующих и поиска новых каналов привлечения клиентов представлены эффективные формы взаимодействия с клиентами, ориентированные на получение дополнительного объема дохода и прибыли ОАО «РЖД». Составлен прогноз обращений по наиболее прогрессивным, по мнению авторов статьи, каналам привлечения клиентов с учетом влияния транспортного рынка, что позволит повысить уровень привлекательности данного сервиса.

Анализ прогнозных значений на 2022 год позволяет сделать выводы о повышении уровня привлекательности данного сервиса, что подтверждает проведенный расчет значений прироста уровня доходности.

### Список литературы

1. Стратегия развития Холдинга «РЖД» на период до 2030 года. М. : ОАО «РЖД», 2013. URL : <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=804> (дата обращения 5.04.2021).
2. Российские железные дороги : офиц. сайт. URL: <http://www.rzd.ru> (дата обращения 5.04.2021).
3. О стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. : распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 № 877-р.
4. Сохранить дорогое // Гудок. 2013. Вып. 57. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=890057> (дата обращения 5.04.2021).
5. Курганов В.М. Эффективность логистики и конкурентоспособность России // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 1 (44). С. 19–23.
6. Нестеров В.Н. Качество обслуживания грузовладельцев и потенциал транспортной компании // Транспорт: наука, техника, управление. 2011. № 6. С. 26–30.
7. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 № 1734-р.
8. Сханова С.Э., Попова О.В., Горев А.Э. Транспортно-экспедиционное обслуживание : учеб. пособие. М. : Академия, 2005. 432 с.
9. Концепция клиентоориентированности холдинга «РЖД» в области грузовых перевозок : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 7.12.2016. № 2487/р.

10. Оленевич А.А., Гуд Ю.О., Асташков Н.П. Математическая формализация транспортного обслуживания промышленных предприятий // Молодая наука Сибири. 2020. № 2 (8). С. 133–138.
11. Александрова К.В. Вернуть грузы на сеть поможет комплексная логистика // РЖД-партнер. 2013. № 15. С. 20–22.
12. Резер С.М. Единые мультимодальные логистические процессы – основа эффективного взаимодействия ОАО «РЖД» и портов // Интегрированная логистика. 2012. № 1. С. 9–13.
13. 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 et. al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1064. 012025. DOI:10.1088/1757-899X/1064/1/012025.
14. Усатая Е.Р., Власова Н.В. Необходимость и оправданность передвижных консультационно-диагностических центров // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 1. С. 173–177.
15. Демидов И.И. Точка зрения // РЖД-партнер. 2013. № 13-14. С. 32.
16. Automation of individual operations of the transport process to create sufficient conditions for the efficient functioning of digital transport and logistics / E.A. Guseva et. al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 1064. 012014. DOI:10.1088/1757-899X/1064/1/012014.
17. Automated calculation method effect values in load securing elements fixed on a rolling stock / N.V. Vlasova et. al. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, 1064 (2021) 012042. DOI:10.1088/1757-899X/1064/1/012042.
18. Необходимость формирования конкурентных преимуществ при перевозке грузов на небольшие расстояния / Ю.О. Гуд и др. // Инструменты и механизмы устойчивого инновационного развития : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Стерлитамак, 2020. С. 104–107.
19. Оленевич В.А., Власова Н.В. Оценка удовлетворенности качеством услуг грузовых железнодорожных перевозок // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2021. № 8. С. 187–188.
20. Методы прогнозирования и оптимизации транспортной сети с учетом мощности пассажиро- и грузопотоков / В.Е. Гозбенко, А.Н. Иванков, М.Н. Колесник и др. Деп. рукопись № 330-В2008 17.04.2008.
21. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network by using the automation of a Voronoi diagram // Transportation Research Procedia. 2018. С. 427–433.
22. Гозбенко В.Е., Крипак М.Н., Иванков А.Н. Совершенствование транспортно-экспедиционного обслуживания грузовладельцев. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2011. 176 с.
23. Власова Н.В., Назаренко Е.А. Разнообразие методологических подходов к расчету показателей рентабельности // Современные проблемы цивилизации и устойчивого развития в информационном обществе : сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. Махачкала, 2021. С. 252–257.
24. Асташков Н.П., Оленевич А.А. Изменение технологии работы транспортно-технологической системы железнодорожного транспорта за счет использования нового типа подвижного состава // Наука сегодня: задачи и пути их решения : материалы междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 16–17.
25. Гозбенко В.Е., Оленевич В.А. Повышение безопасности работы железнодорожной транспортной системы на основе автоматизации технологии размещения и крепления груза в вагоне // Известия Транссиба. 2013. № 1 (13). С. 110–116.

### References

1. Strategiya razvitiya Kholdinga «RZHD» na period do 2030 goda [Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030]. M: JSC “Russian Railways”, 20.12.2013
2. Rossiyskiye zheleznnye dorogi: ofits. sayt [Russian Railways: official website]. URL: <http://www.rzd.ru> (accessed 5.04.2021).
3. O strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 g.: rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17.06.2008 № 877-r. [Decree of the Government of the Russian Federation dated 17.06.2008 No. 877-r "On the strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030"].
4. Sokhranit' dorogoye [Save expensive]. *Gudok* [Gudok], 2013. Issue. 57. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=890057>.
5. Kurganov V.M. Effektivnost' logistiki i konkurentosposobnost' Rossii [Logistics efficiency and competitiveness of Russia]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2013, No. 1 (44), pp. 19–23.
6. Nesterov V.N. Kachestvo obsluzhivaniya gruzovladel'tsev i potentsial transportnoy kompanii [The quality of cargo owners' service and the potential of a transport company]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye* [Transport: science, technology, management]. 2011, No. 6, pp. 26–30.
7. Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda : utv. rasporyazheniyem Pravitel'stva Ros. Federatsii ot 22.11.2008 № 1734-r [Transport strategy of the Russian Federation for the period till 2030 / 11.06.2014 Order No. 1032-R].
8. Shanova S.E., Popova O.V., Gorev A.E. Transportno-ekspeditsionnoye obsluzhivaniye: ucheb. posobiye [Freight forwarding services. Textbook]. M.: Akademiya Publ., 2005, 432 p.
9. Kontseptsiya klijentooriyentirovannosti kholdinga «RZHD» v oblasti gruzovykh perevozok : utv. rasporyazheniyem OAO «RZHD» ot 7.12.2016. № 2487/r [The concept of customer centricity of Russian Railways in the field of freight transport, approved by the order of JSC "Russian Railways" dated December 7, 2016. No. 2487/R].
10. Olentsevich A.A., Gould Y.O., Ostashkov N.P. Matematicheskaya formalizatsiya transportnogo obsluzhivaniya promyshlennykh predpriyatij [Mathematical formalization of transport services of industrial enterprises]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia]. 2020, No. 2 (8), pp. 133–138.
11. Alexandrova K.V. Vernut' gruzy na set' pomozhet kompleksnaya logistika [Complex logistics will help to return cargo to the network]. *RZHD-partner* [RZD-partner]. 2013, No. 15, pp. 20–22.

12. Rezer S.M. Yedinyye mul'timodal'nyye logisticheskiye protsessy – osnova effektivnogo vzaimodeystviya OAO «RZHD» i portov [Unified multimodal logistics processes – the basis of effective interaction of JSC "Russian Railways" and ports]. *Integrirrovannaya logistika [Integrated logistics. Scientific Information Journal]*. 2012, No. 1, pp. 9–13.

13. Lysenko D.A., Olentsevich V.A., Vlasova N.V., Konyukhov V.Yu. Formation of new principles and models of operation of structural units of the industry under the conditions of implementation of digital technologies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 1064 (2021) 012025.

14. Usataya E.R., Vlasova N.V. Neobkhodimost' i opravdannost' peredvizhnykh konsul'tatsionno-dagnosticheskikh tseftrov [Necessity and justification of mobile consulting and diagnostic centers]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*. 2017, Vol. 1, pp. 173–177.

15. Demidov I.I. Tochka zreniya [Point of view]. RZHD-partner [RZD-partner]. 2013, No. 13–14. p. 32.

16. Guseva E.A., Konstantinova M.V., Olentsevich V.A., Konyukhov V.Yu., Olentsevich A.A. Automation of individual operations of the transport process to create sufficient conditions for the efficient functioning of digital transport and logistics. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 1064 (2021) 012014.

17. 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.

18. Gud Yu.O., Olentsevich A.A., Vlasova A.N., Olentsevich V.A. Neobkhodimost' formirovaniya konkurentnykh preimushchestv pri perevozke gruzov na nebol'shiye rasstoyaniya [The need to form competitive advantages when transporting goods over short distances]. *Instrumenty i mekhanizmy ustoychivogo innovatsionnogo razvitiya : sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf [In the collection: Tools and mechanisms of sustainable innovative development. Collection of articles on the results of the International Scientific and Practical Conference]*. Sterlitamak, 2020, pp. 104–107.

19. Olentsevich V.A., Vlasov N.In. Otsenka udovletvorennosti kachestvom uslug gruzovykh zheleznodorozhnykh perevozok [Assessment of satisfaction with service quality of rail freight transport]. *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress [Modern technologies and scientific and technical progress]*, 2021, No. 8, pp. 187–188.

20. Gozbenko V.E., Ivanov A.N., Kolesnik M.N., Pashkova A.S. Metody prognozirovaniya i optimizatsii transportnoy seti s uchetom moshchnosti passazhiro- i gruzopotokov [Methods of forecasting and optimization of the transport network taking into account the capacity of passenger and cargo flows]. Dep. rukopis' № 330-V2008 17.04.2008.

21. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*, 2018, pp. 427–433.

22. Gozbenko V.E., Kripak M.N., Ivankov A.N. Sovershenstvovaniye transportno-ekspeditsionnogo obsluzhivaniya gruzovladel'tsev [Improving forwarding services for cargo owners]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2011, 176 p.

23. Vlasova N.In., Nazarenko E.A. Raznoobraziye metodologicheskikh podkhodov k raschetu pokazateley rentabel'nosti [The Variety of methodological approaches to the calculation of profitability]. *Sovremennyye problemy tsivilizatsii i ustoychivogo razvitiya v informatsionnom obshchestve : sb. materialov III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [In the collection: Modern problems of civilization and sustainable development in the information society. Collection of materials of the 3rd International scientific and practical conference]*. Makhachkala, 2021, pp. 252–257.

24. Astashkov N.P., Olentsevich A.A. Izmeneniye tekhnologii raboty transportno-tekhnologicheskoy sistemy zheleznodorozhnogo transporta za schet ispol'zovaniya novogo tipa podvizhnogo sostava [Changing the technology of the transport and technological system of the railway transport due to the use of a new type of rolling stock]. *Nauka segodnya: zadachi i puti ikh resheniya : materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [In the collection: Science today: tasks and ways to solve them. Materials of the international scientific and practical conference]*, 2019, pp. 16–17.

25. Gozbenko V.E., Olentsevich V.A. Povy'shenie bezopasnosti raboty zheleznodorozhnoy transportnoy sistemy na osnove avtomatizatsii tekhnologii razmeshheniya i krepleniya gruzov v vagone [Improving the safety of the railway transport system based on automation of the technology of placing and securing cargo in the car]. *Izvestiya Transsiba [News of the Transsib]*, 2013, No. 1 (13), pp. 110–116.

### Информация об авторах

**Власова Наталья Васильевна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: natalya.vlasova.76@list.ru.

**Оленцевич Виктория Александровна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olencevich\_va@mail.ru.

**Асташков Николай Павлович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astashkovnp@yandex.ru.

### Information about the authors

**Nataliya V. Vlasova** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Operation Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: natalya.vlasova.76@list.ru.

**Viktoria A. Olencevich** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Operation Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olencevich\_va@mail.ru.

**Nikolay P. Astashkov** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Operation Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: astashkovnp@yandex.ru

## Применение различных способов пропуска поездов

В. Н. Знаенко✉, В. Н. Иванов

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

✉ znaenok@yandex.ru

### Резюме

В статье в связи с тенденцией роста тяжеловесного движения рассматриваются средства повышения пропускной способности участков железной дороги и увеличения массы поезда за счет применения соединенных поездов. Приведена историческая справка появления технологии пропуска соединенных поездов, перечислены ее основные преимущества и область применения соединенных поездов для решения проблем, связанных с провозной способностью. Представлены показатели пропуска сдвоенных поездов по Восточно-Сибирской железной дороге за 2019 и 2020 г., анализ которых показал рост качественных показателей по весовой норме. Была проанализирована работа соединенных поездов, в результате чего выделены основные недостатки: потеря времени на соединение и рассоединение сдвоенных поездов, резкая просадка напряжения в контактной сети, требование к наличию устойчивой связи между локомотивами, присутствие высококвалифицированных локомотивных бригад в голове каждого поезда и др. Предложено решение перечисленных проблем за счет внедрения инновационных технологий в виде интеллектуальной системы автоматизированного вождения поездов с распределенной тягой ИСАВП-РТ-М, которое позволяет применять технологию вождения поездов по системе «виртуальной сцепки», избегая физического соединения поездов и реализуя автоведение для локомотивов ведомых поездов, следующих в попутном направлении, без локомотивной бригады, либо управление локомотивом в одно лицо. В статье описана работа данной системы, а также представлен способ оптимизации движения на участке железной дороги с автоблокировкой. Указаны преимущества и перспективы развития технологии «виртуальной сцепки». Предложено применять указанную технологию для оптимизации пропуска соединенных поездов по Красноярской и Восточно-Сибирской железной дороге.

### Ключевые слова

поезд, масса поезда, автоведение, пропускная способность, тяжеловесное движение, соединенные поезда, «виртуальная сцепка», провозная способность, межпоездной интервал

### Для цитирования

Знаенко В. Н. Применение различных способов пропуска поездов / В. Н. Знаенко, В. Н. Иванов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 179–187. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).179-187

### Информация о статье

поступила в редакцию: 10.09.2021, поступила после рецензирования: 17.10.2021, принята к публикации: 19.10.2021

## Application of different methods of train passage

V. N. Znaenok✉, V. N. Ivanov

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

✉ znaenok@yandex.ru

### Abstract

In this article, in connection with the growth trend of heavy traffic, means of increasing the carrying capacity of railway sections and the mass of a train due to the use of connected trains are considered. The article provides a historical background of the emergence of the technology of passing connected trains, lists its main advantages and the scope of application of connected trains for solving problems related to carrying capacity. The article presents the indicators of the passage of double trains on the East Siberian Railway for 2020, the analysis of which showed an increase in quality indicators in terms of weight norm. The work of the connected trains was analyzed, resulting in highlighting of the main disadvantages, such as: the loss of time for connecting and disconnecting double trains, a sharp voltage drop in the contact network, the requirement for a stable connection between locomotives, as well as the presence of highly qualified locomotive crews in the head of each train, etc. A solution to the above problems is proposed through the introduction of innovative technologies in the form of an intelligent system of automated driving of trains with distributed traction ISAVP-RT-M, which allows using the technology of driving trains according to the "Virtual Coupling" system, avoiding the physical connection of trains and realizing locomotives of slave trains traveling in the same direction, without a locomotive crew, or locomotive control by one person. The article describes the operation of this system, and also presents a way to optimize movement on a section of a railroad with automatic blocking. The advantages and prospects for the development of the "virtual coupling" technology are indicated. It is proposed to apply this technology to optimize the passage of connected trains along the Krasnoyarsk and East Siberian railways.

**Keywords**

train, train weight, driving, traffic capacity, heavy traffic, connected trains, “virtual coupling”, carrying capacity, train spacing

**For citation**

Znaenok V. N, Ivanov V. N, Primeneniye razlichnykh sposobov propuska poyezdov [Application of various methods of train passage]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 179–187. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).179-187

**Article info**

Received: 10.09.2021, Revised: 17.10.2021, Accepted: 19.10.2021

**Введение**

Согласно разработанной ОАО «РЖД» Долгосрочной программе развития до 2025 г. прогнозный объем грузооборота без учета порожнего пробега в 2025 г. по базовому сценарию должен составить 3 млрд 166,4 млн т-км. Также в программе предусмотрено увеличение провозной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей до 180 млн т-км в 2024 г. [1].

Для реализации поставленных задач компании необходимо предпринять ряд мер, которые заключаются не только в увеличении клиентской базы, но и способности инфраструктуры обеспечить выполнение данных показателей. Одним из инновационных направлений холдинга для достижения такого результата является организация грузового тяжеловесного движения поездов.

Тяжеловесное грузовое движение предполагает организацию пропуска грузовых поездов с массой состава 6 300 т и более с включением в состав вагонов с нагрузкой на ось 23,5; 25 т и более. В современных реалиях роста объема перевозок массовых грузов, таких как нефть, уголь, руда, металл и другие, это является важнейшим рычагом интенсификации перевозочных мощностей основных направлений, удовлетворяющим систематические потребности увеличения пропускной способности.

Повышение среднего веса поезда оказывает положительное влияние на производительность локомотивного парка, качественного использования рабочего времени локомотивных бригад, провозную способность участков и направлений магистрали. Позволяет повысить эффективность работы железных дорог в рыночных условиях, поэтому является одним из приоритетных направлений в деятельности компании [2].

Развитие тяжеловесного движения – задача комплексная и реализуется по ряду направлений: поставка современных локомоти-

вов, усиление тягового электроснабжения, модернизация устройств сигнализации, централизации, блокировки (СЦБ) и связи, строительство главных путей и т. д. Такие решения требуют значительный объем инвестиций и реализации в долгосрочном периоде. Ключевой фактор для повышения пропускной и провозной способности, не требующий больших инвестиций и реализуемый в краткосрочном периоде, лежит в применении определенных технологических решений.

Для повышения провозной способности и массы поезда существует весьма эффективное средство ускорения продвижения вагонопотоков по затрудненным участкам – сдвигание поездов.

**Сдвоенные поезда: история и современность**

В правилах технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (ПТЭ ЖД РФ) приведено следующее определение: «поезд грузовой соединенный – грузовой поезд, составленный из двух и более сцепленных между собой грузовых поездов с действующими локомотивами в голове каждого поезда» [3].

За счет пропуска соединенных поездов можно увеличить провозную способность участка. Особенно это решение помогает в сокращении задержек поездов при предоставлении технологических «окон» для производства ремонтно-путевых работ [4].

История применения сдвоенных поездов берет свои истоки во времена Великой Отечественной войны. В дни войны, изыскивая средства для повышения провозной способности линии, машинисты-тяжеловесники и передовые диспетчеры предложили и осуществили сдвигание поездов. Впервые такое решение было применено на Томской железной дороге для кольцевых маршрутов с целью ускорения продвижения составов с углем и усиления провозной способности отдельных участков, главным

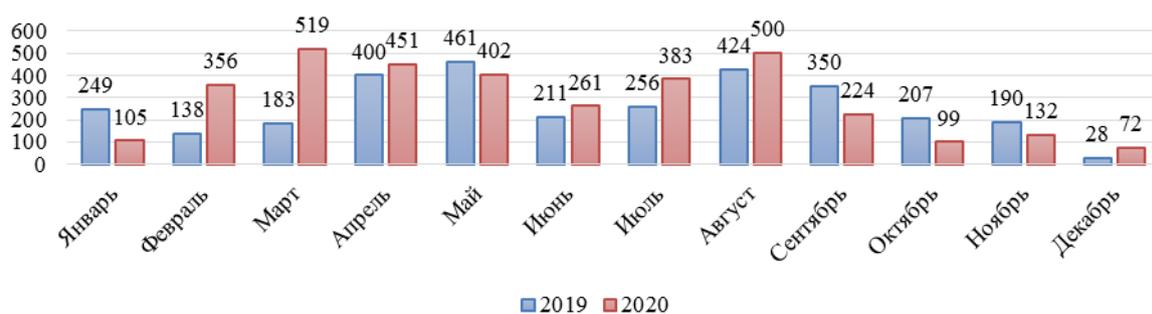
образом однопутных [5]. Данное решение быстро получило распространение по различным магистралям.

Сегодня применение сдвоенных поездов активно используется по всей сети железных дорог ОАО «РЖД» и продолжает развиваться и приносить качественные показатели. На рис. 1 представлена информация о количестве сформированных соединенных поездов на Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД) за 2019 и 2020 г.

По информации Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры всего на протяжении 12 мес. 2020 г. по Восточно-Сибирской железной дороге было проведено 3 504 соединенных поездов. Это превосходит показатель аналогичного периода за 2019 г., прирост случаев формирования соединенных поездов составляет 13 %. В табл. 1 приведены данные о соединенных поездах, пропущенных по ВСЖД за 2019 и 2020 г.

Анализ данных таблицы показывает, что средняя длина поезда и количество осей в течение года в среднем остается без изменения и составляет соответственно 134 и 535. Средняя масса соединенных поездов в 2020 г. по сравнению с предыдущим в среднем увеличилась на 226 т и составила 11 213 т. При неизменном количестве осей и длине поезда масса сдвоенных поездов и их количество с каждым годом продолжает увеличиваться (рис. 2).

Технология вождения соединенных поездов повышенной массы также активно развивается и на Красноярской железной дороге. По информации пресс-центра Красноярской железной дороги по состоянию на 2020 г. прирост случаев использования соединенных поездов составляет 8 % по отношению к 2019 г., их масса достигает 12 тыс. т. Для сравнения, средняя масса грузового поезда на Красноярской железной дороге составляет 4,1 тыс. т.



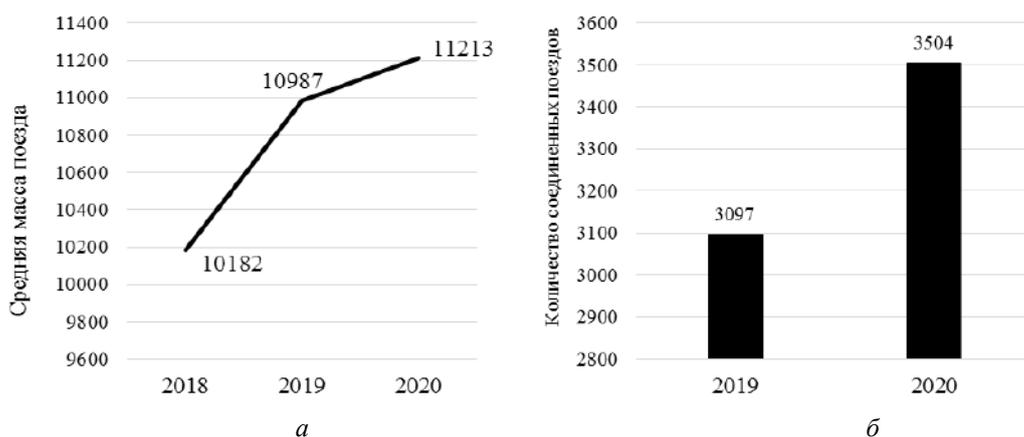
**Рис. 1.** Количество сформированных соединенных поездов в 2019 и 2020 г. на Восточно-Сибирской железной дороге

**Fig. 1.** The number of formed connected trains in 2019 and 2020 at the East Siberian railroad

**Таблица 1.** Данные о сформированных соединенных поездах на Восточно-Сибирской железной дороге за 2019–2020 гг.

**Table 1.** Data on formed connected trains on the ESSR for 2019–2020

Месяц	Средняя масса поезда (т)		Количество осей в поезде		Средняя длина поезда	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Январь	11 453	12 382	531	524	133	131
Февраль	10 572	12 225	537	528	134	132
Март	10 518	12 328	539	527	135	132
Апрель	10 814	12 429	534	525	134	132
Май	10 303	10 839	544	538	136	135
Июнь	8 733	10 997	554	539	139	135
Июль	10 433	9 529	537	551	134	138
Август	10 720	9 709	534	550	133	138
Сентябрь	11 880	9 424	525	550	131	138
Октябрь	11 595	9 939	533	544	133	136
Ноябрь	12 327	12 316	523	524	131	131
Декабрь	12 450	12 434	524	524	131	131



**Рис. 2.** Средняя масса поезда (а) и количество сформированных соединенных поездов (б) на Восточно-Сибирской железной дороге  
**Fig. 2** Mean train mass (a) and the number of formed connected trains (b) on the East Siberian Railroad

По представленным данным видно, что применение соединенных поездов оказывает положительное влияние на работу железной дороги и приносит пользу, но только по весовой норме. С чем это может быть связано? Говоря о полезных свойствах соединенных поездов, нельзя забывать о наличии определенных сложностей, возникающих при их пропуске.

### Виртуальная сцепка

Формирование соединенных поездов, их стыковка и рассоединение требуют значительных затрат времени, нередко это приводит к уменьшению участковой скорости. Для вождения соединенных поездов требуются опытные высококвалифицированные локомотивные бригады в голове каждого поезда действующих локомотивов. Так как в соединенном поезде есть свои нюансы в управлении тормозами и режиме ведения поезда, для машиниста головного и среднего локомотива они немного разные, все это направлено на недопущение разрыва поезда и предотвращение выдавливания вагонов головного состава локомотивом и составом второго поезда, что может привести к серьезному крушению. Помимо этого, немаловажным требованием является наличие устойчивой связи между бригадами локомотивов, так при некачественной связи, либо отказах на подвижном составе, поезда приходится рассоединять, что также приводит к потерям времени. При движении соединенного поезда по участку наблюдается просадка напряжения в контактной

сети, это вводит ограничения по количеству пропуска соединенных, либо тяжеловесных поездов, а также способствует увеличению межпоездного интервала.

С опорой на сказанное, поставлена цель поиска решения проблемы безопасного вождения соединенных поездов с минимальными затратами времени на сцепку и оптимальным режимом ведения соединенных поездов. Решением упомянутых проблем может служить применение технологии «виртуальной сцепки» с помощью интеллектуальной системы автоматизированного вождения поездов с распределенной тягой ИСАВП-РТ-М.

ИСАВП-РТ-М предназначена для автоматизированного асинхронного и синхронного управления грузовыми электровозами при вождении соединенных поездов. Данная система учитывает профиль пути, постоянные и временные ограничения, продольно-динамические усилия и выбирает энергооптимальный режим ведения поезда.

Работает система следующим образом. При вождении поездов по технологии «виртуальная сцепка» между локомотивами по радиоканалу устанавливается соединение, осуществляется непрерывный обмен данными (место нахождения, длина, вес, текущий режим работы, перспективный режим работы). Следующий локомотив (ведомый), идущий в попутном следовании, обрабатывая информацию с впереди идущего локомотива, выбирает наиболее оптимальный режим работы [6].

Модернизированная унифицированная микропроцессорная система автоведения электропоезда (УСАВП) с установленной системой ИСАВП-РТ-М ведомого поезда, основываясь на информации, поступающей от ведущего поезда, производит расчет момента изменения сигнала огня локомотивного светофора с «желтого» на «зеленый» или с «красно-желтого» на «желтый». Таким образом, соблюдается наименьшее безопасное расстояние между ведущим и ведомым поездами без применения торможения, без нарушения скоростей движения, контролируемых устройствами безопасности. Таким образом, производится непрерывный расчет эффективности работы системы торможения как своего состава, так и виртуально сопряженного для расчета оптимальной траектории ведения поезда.

Технология «виртуальной сцепки» позволяет избежать физического соединения поездов, когда ведущий состав останавливается, ведомый проезжая под запрещающий сигнал стыкуется с первым, объединяется тормозная магистраль, происходит опробование тормозов и т. д. В случае «виртуальной сцепки» второй состав отправляется следом за первым, между локомотивами осуществляется связь по радио-

каналу, такие составы двигаются с минимальным расстоянием между двумя составами, но двигаются как один соединенный поезд. Выигрыш в этом случае состоит в сокращении межпоездного интервала, а также не приходится затрачивать время для физического объединения поездов [7–13].

На рис. 3 представлен способ оптимизации движения на участке с автоблокировкой. Вверху представлен стандартный участок с автоблокировкой с десятью светофорами, на котором располагаются три состава. На следующей картинке показано как с помощью технологии ИСАВП-РТ-М можно оптимизировать движение на таком участке. Реализованное движение по системе «виртуально сцепки» позволит отправить по магистрали уже две пары виртуально соединенных поездов. На нижней картинке представлена перспектива развития данной технологии – это вождение пакета поездов до пяти локомотивов.

Другим преимуществом предлагаемого решения является наличие системы автоведения, задействовать которую можно для ведомого локомотива, таким образом облегчить труд локомотивных бригад. Возможно варианты управления ведомым локомотивом в одно лицо,

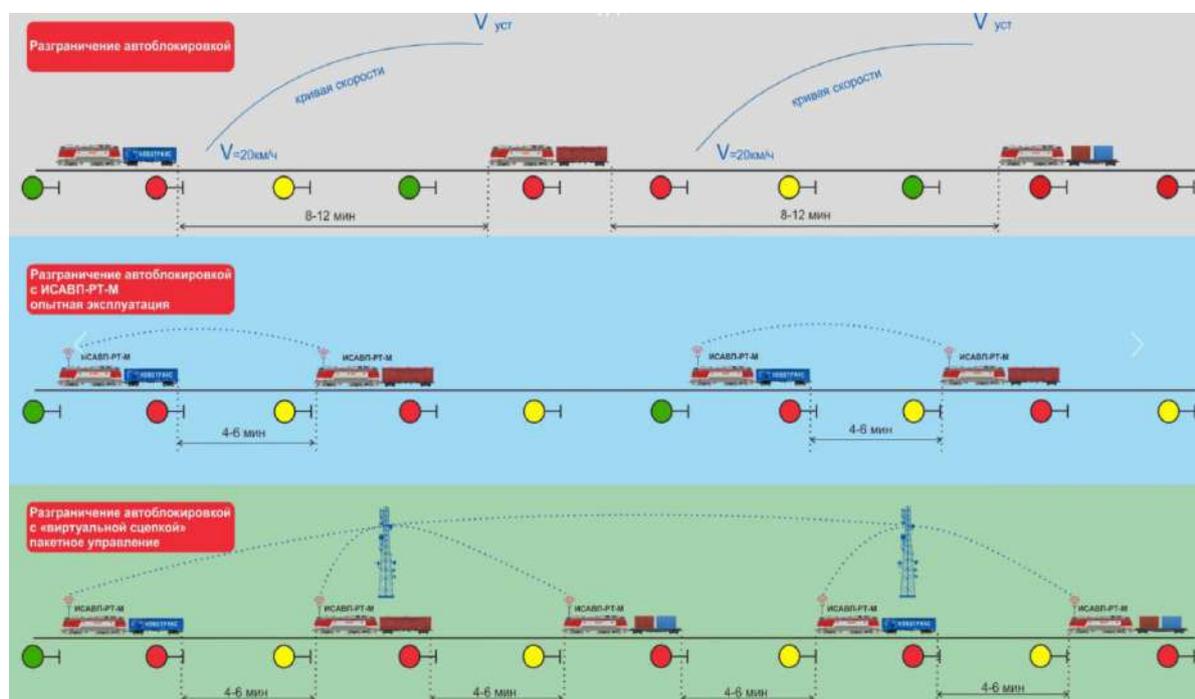


Рис. 3. Применение ИСАВП-РТ-М на участке движения  
Fig. 3. Application of ISAVP-RT-M on the traffic area

либо с помощью системы автоведения без локомотивной бригады. Таким образом, в перспективе одна локомотивная бригада сможет провести пять поездов по перегону [14].

Благодаря уже заложенным решениям обеспечено дальнейшее развитие технологии:

- организация пакета до пяти локомотивов, работающих по технологии «Виртуальная сцепка»;

- организация сетей радиообмена внутри пакета локомотивов, работающих по технологии «виртуальная сцепка» за счет встроенного приемника сигналов спутниковой навигации;

- вождение пакетов в период проведения «окон»;

- организация сетей управления пакетом поездов по сетям 4G/LTE за счет встроенного LTE модема;

- улучшение энергообеспечения поездов за счет накопления данных о напряжении в контактной сети и потребляемом токе локомотива, привязанных к пути.

Задействовать данное решение предлагается по всей Красноярской железной дороге и Восточно-Сибирской железной дороге от Тайшета до Иркутска, где отсутствует необходимость применения подталкивающего движения. Основные составляющие эффекта от применения: увеличение пропускной способности участков железных дорог (до 15 дополнительных пар поездов в сутки), повышение безопасности движения, облегчение труда локомотивных бригад, повышение технической и участковой скоростей.

Технология «виртуальной сцепки», разработанная ООО «АВП Технология», успешно прошла эксплуатационные испытания на Дальневосточной магистрали. В ходе испытаний, которые начались 1 ноября 2019 г., за 9 мес. было проведено 245 поездов. За счет применения «виртуальной сцепки» время хода на участке Хабаровск – Ружино – Смоляниново удалось снизить в среднем на 23 мин. [15].

Немаловажным преимуществом внедрения «виртуальной сцепки» является сокращение межпоездного интервала, что дает возможность увеличить пропускную способность. Проанализируем эффект внедрения ИСАВП-РТ-М на примере двухпутного участка железной дороги, оборудованного автоблокировкой. Пропускная способность перегона зависит от типа графика и величины его элементов, а так-

же от путевого развития отдельных пунктов [16]. В общем виде пропускная способность определяется выражением:

$$N = \frac{(1440 - t_{техн}) \alpha_n}{T_{пер}},$$

где 1 440 – количество минут в сутках, мин;  $t_{техн}$  – продолжительность технологических «окон» в графике движения, мин;  $\alpha_n$  – коэффициент, учитывающий надежность технических средств;  $T_{пер}$  – период графика, мин.

Под технологическим «окном» понимается свободный от пропуска поездов промежуток времени, предоставляемый в графике движения и необходимый для выполнения работ по текущему содержанию и ремонту устройств пути, контактной сети, сигнализации, централизации и блокировки. Продолжительность технологического «окна» зависит от типа применяемых машин и механизмов, а также от принятой технологии работ и принимается в расчетах пропускной способности на двухпутных линиях и участках со вставками для безостановочного скрещения поездов равной 120 мин.

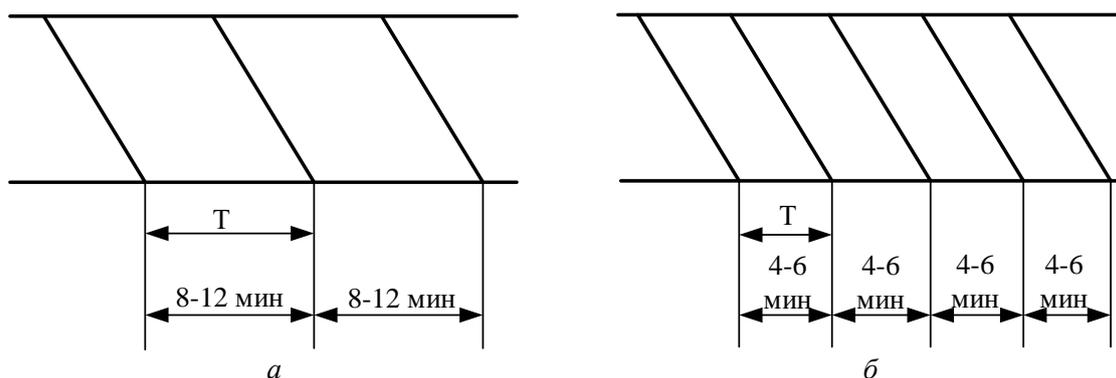
Значение  $\alpha_n$  для двухпутных линий колеблется в диапазоне 0,86–0,98.

Периодом графика на двухпутном участке с автоблокировкой является интервал между поездами. Приняв межпоездной интервал при стандартном варианте 8–12 мин., а при технологии «виртуальной сцепки» 4–6 мин. (рис. 4), можно вычислить и сравнить значение пропускной способности участка железной дороги при различных способах пропуска поездов.

Анализируя указанную формулу, можно сказать, что за счет сокращения межпоездного интервала в результате применения технологии «виртуальной сцепки» возможно практически вдвое увеличить пропуск соединенных поездов.

Внедрение технологии «виртуальной сцепки» позволит исключить занятость станционных путей, связанную с операциями по физической сцепке, которые могут занимать от 2 до 4 ч на один сдвоенный поезд [17], что в свою очередь положительно скажется на рациональном использовании труда локомотивных бригад и работы железнодорожной станции.

Одним из основных составляющих эффектов применения технологии «виртуальной сцепки» является повышение участковой скорости. Для расчета участковой скорости используется зависимость:



**Рис. 4.** График движения поездов на двухпутном участке железной дороги, оборудованном автоблокировкой:  
*a* – при стандартном варианте движения; *б* – при использовании виртуальной сцепки  
**Fig. 4.** Train traffic schedule on a double-track section of the railway, equipped with an automatic blocking: *a* – with the standard version of the movement;  
*b* – when using a virtual linkage

$$v_{уч} = \frac{\sum NL}{\sum NT},$$

где  $\sum NL$  – общий пробег, предусмотренный по нормативному графику движения, поездо-км;  $\sum NT$  – общие затраты времени нахождения поездов на участках, определяемые по нормативному графику, поездо-ч.

Для более гибкого способа определения участковой скорости используют выражение, учитывающее значение ходовой скорости и коэффициента, который учитывает потери ходовой скорости, связанные с технологическими факторами, увеличивающими время нахождения поезда на участке:

$$v_{уч} = v_x \cdot \beta_x,$$

где  $v_x$  – значение ходовой скорости, км/ч;  $\beta_x$  – коэффициент скорости.

Коэффициент скорости  $\beta_x$  определяется по формуле:

$$\beta_x = 1 - \frac{T_{зан}}{1440},$$

где  $T_{зан}$  – нормативное время занятия графика движения под все виды работ.

Технология «виртуальной сцепки» производит расчет момента изменения сигнала ог-

ня локомотивного светофора, выдерживая наименьшее безопасное расстояние между ведущим и ведомым поездами без применения торможения и нарушения установленных скоростей движения. Опираясь на данные исследования [18], расчет показателей вариантов пропуска соединенных поездов по технологии «виртуальная сцепка» показал рост участковой скорости на 2,5 км/ч по сравнению с типовым физическим способом соединения поездов.

### Заключение

Развитие тяжеловесного движения – одно из основных решений, позволяющих повысить провозные способности участков. Модернизация существующих способов пропуска поездов за счет внедрения новых технологий позволит значительно улучшить эксплуатационные показатели и эффективность работы железной дороги. Математическое обоснование технологии «виртуальной сцепки», ее сравнение с различными вариантами пропуска поездов с учетом профиля пути и существующих графиков движения по железнодорожным магистралям представляют направление для дальнейшей научной проработки.

### Список литературы

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации 19.03.19 ; Ввод. 19.03.19. URL: <http://government.ru/docs/36094> (дата обращения: 13.04.2021).
2. Кобзев С.А. Поездам придали вес: развитие тяжеловесного движения позволит осваивать растущий грузопоток // Гудок. 2017. № 191. 26 окт. С. 4.
3. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации / ОАО «РЖД». М., 2011. 255 с.

4. Бышляго А.А., Дудакова А.В. Об организации пропуска соединенных поездов в целях повышения провозной и пропускной способности Байкало-Амурской магистрали // Молодая наука Сибири, 2018. № 1. URL: <http://mnv.irkgups.ru/toma/11-2018> (дата обращения 01.01.2021)
5. Тихонов К. Опыт увеличения провозной способности однопутных путей. – Москва: Трансжелдориздат, 1943. 64 с.
6. Виртуальная сцепка ISAVP-PT-M. URL: <https://avpt.ru/products/dlya-gruzovykh-lokomotivov/upravlenie-raspredelennoy-tyagoy-isavp-rt/> (дата обращения 25.12.2020).
7. Щербаченко Т. Сокращая время и расстояние: на Дальневосточной ж.-д. совершенствуется технология «Виртуальной сцепки» разработанной ООО «АВП Технология» // Гудок. 2020. № 26 (17 октября). С. 2.
8. Черепанов А.В., Куцый А.П., Есауленко А.С. Применение технологии виртуальной сцепки для поездов повышенной массы // Молодая наука Сибири : электрон. науч. журн. 2020. № 2(8). URL: <http://mnv.irkgups.ru/toma/28-20> (дата обращения: 10.07.2020).
9. Бушуев С.В., Гундырев К.В., Голочалов Н.С. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки // Автоматика на транспорте. 2021. Т. 7, № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-propusknoy-sposobnosti-uchastka-zheleznoy-dorogi-s-primeneniem-tehnologii-virtualnoy-stseпки/view-eg>. (дата обращения: 10.07.2020).
10. Климова Е.В., Пилипущка Л.Е., Рябов В.С. Технология «виртуальной сцепки» поездов как инструмент повышения провозной и пропускной способности линии // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Т. 1. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2019. С. 60–64.
11. Трумм А.Д. Усиление системы тягового электроснабжения на участке Большой Луг – Слюдянка с учетом пропуска соединенных поездов по системе виртуальная сцепка // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. 2021. № 1. URL: <http://mnv.irkgups.ru/toma/212-2021> (дата обращения: 08.12.2021).
12. Чиров К. Поезда соединят виртуально: Новые методы работы локомотивного комплекса позволят перевозить больше грузов и людей // Гудок. 2020. № 38. 9 июля. С. 1.
13. Власьевский С.В., Малышева О.А., Шабалин Н.Г., Семченко В.В. Оценка энергетической эффективности электровозов ЗЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка» // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 1. С. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-17-25>.
14. Плетнёв С. Поезда на связи: На Восточном полигоне по участку Карымская-Находка 1 августа начнется регулярное движение поездов по технологии «виртуальная сцепка» // Гудок. 2020. № 126. 17 июля. С. 2.
15. Кузьмина Н. «Скованные» одной виртуальной сцепкой: Эксплуатационное локомотивное депо Смоляниново по программе ресурсосбережения получило 150 модулей «Виртуальная сцепка», разработанной ООО «АВП Технология» // Гудок. 2020. № 178. 24 сент. С. 7.
16. Абрамов А.А. Управление эксплуатационной работой. Ч. II. График движения поездов и пропускная способность. М. : РГОТУПС, 2002. 170 с.
17. Оленевич В.А., Упырь Р.Ю., Антипина А.А. Эффективность внедрения интервального регулирования движения поездов по системе «виртуальная сцепка» на участке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. Т. 66, № 2. С. 182–189.
18. Светлакова Е.Н., Каюмова Т.С. Технология «Виртуальная сцепка» – эффективный путь повышения пропускной способности // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте по итогам конференции. 2019. Т. 1. С. 153–157.

## References

1. Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Rossiyskiye zhelezniye dorogi» do 2025 goda [Long-term development program of the Russian Railways open joint-stock company until 2025], Moscow, 2019, 135 p. URL: <http://government.ru/docs/36094> (accessed 13 April 2021).
2. Kobzev S.A. Poyezdam pridali ves: razvitiye tyazhelovesnogo dvizheniya pozvolit osvivaiv' rastushchiy gruzopotok [The trains were given weight: the development of heavy traffic will allow to master the growing freight traffic]. *Gudok* [Gudok], 2017, No. 191 (October 26). pp. 4.
3. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii [Rules of technical operation of railways of the Russian Federation], Moscow, Russian Railways, 2011. 255 p.
4. Byshlyago A.A., Dudakova A.V. Ob organizatsii propuska soedinennykh poyezdov v tselyakh povysheniya provoznoy i propusknoy sposobnosti Baykalo-Amurskoy magistrali [About of the organization of railway traffic with united freight train in order to increase a low-traffic capacity of Baykal-Amur Railroad]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2018, No. 2.
5. Tikhonov K. Opyt uvelicheniya provoznoy sposobnosti odnoputnykh putey [Experience of increasing the carrying capacity of single-track tracks]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1943. 64 p.
6. Virtualnaya stseпка ISAVP-RT-M [Virtual coupling ISAVP-RT-M]. URL: <https://avpt.ru/products/dlya-gruzovykh-lokomotivov/upravlenie-raspredelennoy-tyagoy-isavp-rt/> (accessed 25 December 2020).
7. Shcherbachenko T. Sokrashchaya vremya i rasstoyaniye: na Dal'nevostochnoy zh.d. sovershenstvuyetsya tekhnologiya «Virtual'noy stseпки» razrabotannoy OOO «AVP Tekhnologiya» [Reducing time and distance: on the Far East railway. the technology of "Virtual coupling" developed by LLC "AVP Technology" is being improved]. *Gudok* [Gudok], 2020, No. 26 (October 17). pp. 2.
8. Cherepanov A.V., Kutsyi A.P., Esaulenko A.S. Primeneniye tekhnologii virtual'noy stseпки dlya poyezdov povyshennoy massy [Application of virtual hitch technology for high-mass trains]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2020, No. 2(8). URL: <http://mnv.irkgups.ru/toma/28-20> (accessed: 10.07.2020).

9. Bushuev S.V., Gundyrev K.V., Golochalov N.S. Povysheniye propusknoy sposobnosti uchastka zheleznoy dorogi s primeneniye tekhnologii virtual'noy stsepki [Increasing the throughput of a section of the railway with the use of virtual coupling technology]. *Avtomatika na transporte [Automation in transport]*, 2021, No. 1, Vol. 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-propusknoy-sposobnosti-uchastka-zheleznoy-dorogi-s-priimeneniye-tehnologii-virtualnoy-stsepki/viewer>.

10. Klimova E.V., Pilipushka L.E., Ryabov V.S. Tekhnologiya "virtual'noy stsepki" poyezdov kak instrument povysheniya provoznoy i propusknoy sposobnosti linii [The technology of "virtual coupling" of trains as a tool to increase the carrying and throughput of the line]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2019, Vol. 1, pp. 60–64.

11. Trumm A.D. Usileniye sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na uchastke Bol'shoy Lug – Slyudyanka s uchetom propuska soyedinennykh poyezdov po sisteme virtual'naya stsepka [Reinforcement of traction power supply systems in the Bolshoy Lug – Slyudyanka section, taking into account the passage of connected trains through the Virtual hitch system]. *Molodaya nauka Sibiri [Young science of Siberia]*, 2021, No. 1. URL: <http://mnv.irkups.ru/toma/212-2021> (accessed: 07.12.2021).

12. Chirov K. Poyezda soedinyat virtual'no: Novyye metody raboty lokomotivnogo kompleksa pozvolyat perevozit' bol'she gruzov i lyudey [Trains will be connected virtually: New methods of operation of the locomotive complex will allow transporting more goods and people]. *Gudok [Gudok]*, 2020, No. 38 (July 9). pp. 1.

13. Vlasyevskiy S.V., Malysheva O.A., Shabalin N.G., Semchenko V.V. Otsenka energeticheskoy effektivnosti elektrovozov 3ES5K pri ispol'zovanii tekhnologii interval'nogo regulirovaniya dvizheniya po tipu «virtual'naya stsepka» [Energy efficiency assessment of the 3ES5K electric locomotives when using interval regulation technology in the form of “virtual coupling”]. *Vestnik VNIIZHT [VNIIZHT Bulletin]*, 2020, No. 79 (1), pp. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-17-25>.

14. Pletnev S. Poyezda na svyazi: Na Vostochnom poligone po uchastku Karymskaya-Nakhodka 1 avgusta nachnotsya regul'yarnoye dvizheniye poyezdov po tekhnologii «virtual'naya stsepka» [Trains in touch: At the Eastern training ground along the Karymskaya-Nakhodka section on August 1, regular train traffic will begin using the "virtual coupling" technology]. *Gudok [Gudok]*, 2020, No. 126 (July 17). pp. 2.

15. Kuzmina N. «Skovannye» odnoy virtual'noy stsepkoj: Ekspluatatsionnoye lokomotivnoye depo Smolyaninovo po programme resursoberezheniya poluchilo 150 moduley «Virtual'naya stsepka», razrabotannoy OOO «AVP Tekhnologiya [“Shackled” by one virtual coupling: The operational locomotive depot Smolyaninovo under the resource saving program received 150 modules “Virtual coupling” developed by OOO AVP Technology]. *Gudok [Gudok]*, 2020, No. 178 (September 24). pp. 7.

16. Abramov A.A. Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy: Ch. II. Grafik dvizheniya poyezdov i propusknaya sposobnost [Operations management: Ch. II. Train schedule and throughput]. Moscow: RGOTUPS Publ., 2002, 170 p.

17. Olentsevich R.Yu. Upry A.A. Effektivnost' vnedreniya interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poyezdov po sisteme «virtual'naya stsepka» na uchastke [Effectiveness of the implementation of interval regulation of train movement according to the system "virtual coupling" on the site]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2020, Vol. 66, No. 2. pp. 182–189.

18. Svetlakova E.N., Kayumova T.S. Tekhnologiya «Virtual'naya stsepka» – effektivnyy put' povysheniya propusknoy sposobnosti [“Virtual Coupling” Technology – an Effective Way to Increase Throughput]. *Innovatsionnyye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte po itogam konferentsii [Innovative technologies in railway transport following the results of the conference]*, 2019, Vol. 1, pp. 153–157.

#### Информация об авторах

**Знаенко Вячеслав Николаевич** – аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [znaenock@yandex.ru](mailto:znaenock@yandex.ru).

**Иванов Владимир Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [v.n.ivanov40161@yandex.ru](mailto:v.n.ivanov40161@yandex.ru).

#### Information about the authors

**Vyacheslav N. Znaenok** – Post-Graduate Student of Department «Electric Rolling», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [znaenock@yandex.ru](mailto:znaenock@yandex.ru).

**Vladimir N. Ivanov** – Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Electric Rolling», IrSTU, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [v.n.ivanov40161@yandex.ru](mailto:v.n.ivanov40161@yandex.ru).

## Плавное регулирование возбуждения на электровозах однофазно-постоянного тока

В. В. Макаров<sup>1</sup>✉, В. В. Семченко<sup>2</sup>

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

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

✉ makarov\_vv@irgups.ru

### Резюме

Повышение энергетической и эксплуатационной эффективности использования электроподвижного состава – стратегическая задача локомотивного комплекса ОАО «Российские железные дороги» и компании в целом. Обе задачи решаются с помощью повышения тяговых и сцепных качеств электровозов и увеличения их энергетических показателей. В настоящее время на электровозах однофазно-постоянного тока Дирекции тяги ОАО «Российские железные дороги» применяется плавное зонно-фазовое регулирование скорости изменением напряжения, для расширения диапазона ее регулирования используется изменение магнитного потока. Одним из способов регулирования магнитного потока (намагничивающей силы) главных полюсов тяговых электрических двигателей является ступенчатый, или контакторно-реостатный способ. Такой способ не позволяет использовать всю область возможного изменения магнитного потока. На электровозах основных серий грузового движения ВЛ80Р, ВЛ85, 2ЭС5К реализовано три ступени регулирования магнитного потока. Последняя позиция при регулировании скорости считается резервной, она обеспечивает около 10 % диапазона регулирования. Таким образом, в конструкцию заведомо закладывается существенный недостаток. Плавное регулирование намагничивающей силы тягового электрического двигателя позволяет расширить диапазон регулирования силы тяги, улучшить энергетические показатели электровоза. В статье отмечены другие недостатки традиционной ступенчато-реостатной системы, рассмотрены электромагнитные процессы в цепи выпрямленного тока, показан плавный, ранее не описанный способ реализации регулирования магнитного потока главных полюсов, обоснован метод его изменения на традиционной элементной базе.

### Ключевые слова

электровозы однофазно-постоянного тока, регулирование магнитного потока, электромагнитные процессы, энергетические показатели

### Для цитирования

Макаров В. В. Плавное регулирование возбуждения на электровозах однофазно-постоянного тока / В. В. Макаров, В. В. Семченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 188–194. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).188-194

### Информация о статье

поступила в редакцию: 05.09.2021, поступила после рецензирования: 19.10.2021, принята к публикации: 23.10.2021

## Smooth excitation control on single-phase-direct current electric locomotives

V. V. Makarov<sup>1</sup>✉, V. V. Semchenko<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> «Road Implementation Center of Krasnoyarsk Railroad», Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉ makarov\_vv@irgups.ru

### Abstract

Increasing the energy and operational efficiency of the use of electric rolling stock is a strategic task of the locomotive complex of JSC “Russian Railways” and the company as a whole. Both tasks are solved by increasing the traction and coupling qualities of electric locomotives and increasing their energy performance. Currently, single-phase DC electric locomotives of the Traction Directorate of JSC “Russian Railways” use smooth zone-phase regulation of speed by changing voltage, to expand the range of its regulation, a change in magnetic flux is used. One of the ways to regulate the magnetic flux (magnetizing force) of the main poles of traction electric motors is a stepwise, or contactor-rheostatic method. This method does not allow using the entire area of possible changes in the magnetic flux. Three stages of magnetic flux regulation are implemented on electric locomotives of the main series of freight traffic VL80R, VL85, 2ES5K. The last position when adjusting the speed is considered a backup, it provides about 10 % of the control range. Thus, a significant drawback is obviously laid in the design. Smooth regulation of the magnetizing force of a traction electric motor allows you to expand the range of traction force regulation, improve the energy performance of an electric locomotive. The article notes other shortcomings of the traditional step-rheostat system, considers

electromagnetic processes in the rectified current circuit, shows a smooth, previously undescribed method of implementing the regulation of the magnetic flux of the main poles, justifies the method of its change on the traditional element base.

### Keywords

single-phase direct current electric locomotives, magnetic flux regulation, electromagnetic processes, energy indicators

### For citation

Makarov V. V., Semchenko V. V. Plavnoe regulirovanie vzbuzhdeniya na elektrovozakh odnofazno-postoyannogo toka [Smooth excitation control on single-phase-direct current electric locomotives]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No.4(72), pp. 188–194. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).188-194

### Article Info

Received: 05.09.2021, Revised: 19.10.2021, Accepted: 23.10.2021

### Введение

Повышение энергетической и эксплуатационной эффективности использования электроподвижного состава – стратегическая задача локомотивного комплекса ОАО «РЖД» и компании в целом [1, 2].

Регулирование возбуждения (РВ) на электровозах и электроподвижном составе в целом применяется как способ регулирования их скорости или силы тяги [3]. Наиболее известны два способа регулирования магнитного потока (намагничивающей силы): регулирование величины тока возбуждения, протекающего через обмотку возбуждения тягового электрического двигателя (ТЭД); изменение числа ее витков [4]. Второй способ не применяется как из-за усложнения самого двигателя и снижения его надежности, так и из-за снижения его технико-экономических показателей.

Регулирование тока через обмотку возбуждения осуществляется, как правило, контактно-реостатным способом. При таком регулировании параллельно обмотке возбуждения включаются регулируемые по величине активного сопротивления резисторы. Регулирование осуществляется силовыми пневматическими контакторами. Последовательно с резисторами включаются индуктивные шунты. Индуктивность в цепи РВ защищает ТЭД от перегрузки при возможных резких колебаниях напряжения на тяговом двигателе.

Глубина РВ характеризуется коэффициентом РВ  $\beta$ , равным отношению намагничивающей силы главных полюсов при уменьшенном (ослабленном) возбуждении к намагничивающей силе при полном возбуждении (отключенной цепи регулирования). Минимальное значение  $\beta$  определяется коммутационной

надежностью двигателя и реализуется активным сопротивлением индуктивного шунта.

Количество ступеней регулирования магнитного потока на разных сериях электровозов может отличаться. Их увеличение повышает использование потенциальных тяговых качеств, а значит и энергетических показателей работы электроподвижного состава (ЭПС). Вместе с тем увеличение количества позиций (ступеней) регулирования ведет к изменению массогабаритных показателей системы, ее удорожанию, а значит и снижению надежности.

Описанная система РВ применяется на всех серийных эксплуатируемых электровозах грузового и пассажирского движения [5–7]. Аналогичные системы применяются и на подвижном составе городского электрического транспорта [8].

### Недостатки типового способа регулирования возбуждения и способы их устранения

Ступенчатое регулирование намагничивающей силы главных полюсов ТЭД не позволяет полностью использовать весь возможный диапазон регулирования силы тяги, скорости. Колебания тока ТЭД снижают энергетические характеристики электровоза, качество электрической энергии на его токоприемнике и в системе тягового электроснабжения в целом.

На электровозах серии ЭС5К (Ермак) [5] применено автоматическое регулирование возбуждения тяговых машин, но по принципу регулирования оно не отличается от применяемых на других сериях электровозов.

Устранить ряд указанных недостатков позволяет плавное регулирование магнитного потока, которое возможно с применением тиристорных преобразователей, включаемых по-

следовательно с резистором и сглаживающим реактором в описанной схеме.

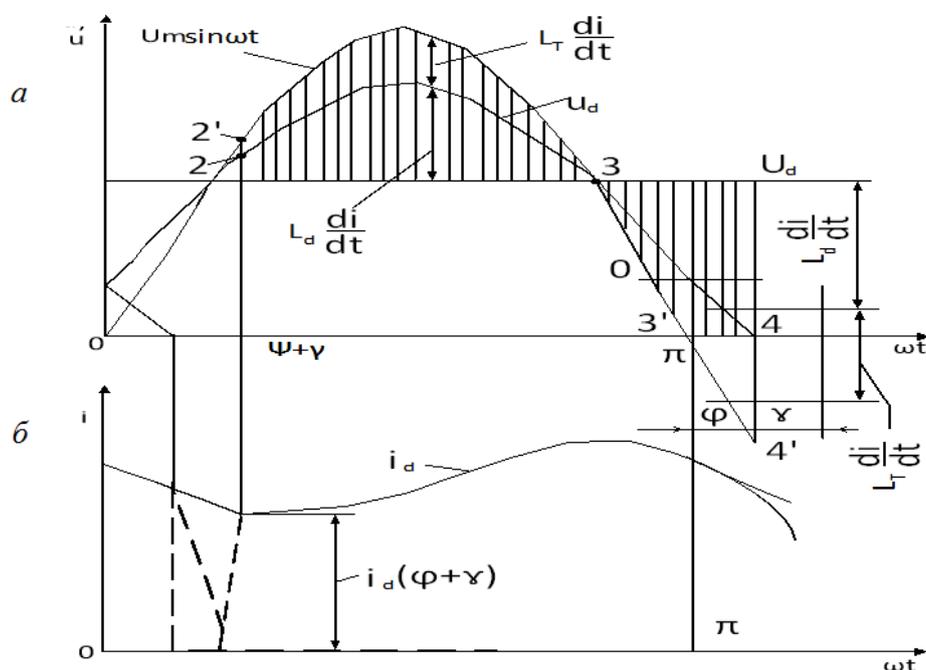
Применение неуправляемых тиристоров в цепях постоянного тока для регулирования напряжения на участке цепи или его работа в качестве ключа требует цепей для искусственного запираания тиристоров с использованием реактивных элементов [9–15]. В маломощных системах применение таких цепей оправдано, что связано с их приемлемыми массогабаритными и энергетическими показателями. Использование запираемых тиристоров делает задачу решаемой без цепей искусственной коммутации [16].

Электровозы «Ермак» идут на смену электровозам ВЛ80Р и ВЛ85 [6, 7], в ближайшие годы «Ермак» станет основным электровозом грузового движения на участках, электрифицированных однофазным переменным током. В преобразовательных установках электровоза применены не запираемые управляемые на открытие полупроводниковые приборы-тиристоры. Для открытия тиристора на нем должно быть прямое напряжение величиной не ниже порогового и управляющий импульс установленных параметров, а для закрытия необходимо, чтобы

ток через него был ниже величины тока удержания. Для снижения тока ниже указанного значения к нему необходимо приложить обратное напряжение, в том числе и от постороннего источника. Ток может снизиться и естественным путем. Источником обратного напряжения может выступать напряжение преобразователя электровоза, что является наиболее предпочтительным (естественное закрытие). Как указано, искусственное закрытие в нашем случае следует считать нецелесообразным.

В цепях электровозов однофазно-постоянного тока имеются элементы, способные накапливать и отдавать электрическую энергию, такими элементами являются обмотки трансформаторов, тяговых двигателей, сглаживающих реакторов, индуктивных шунтов и другие, а также конденсаторы защитных и функциональных цепей. Индуктивности указанных элементов в значительной мере определяют электромагнитные процессы в цепях электровоза, а также его энергетические характеристики [3, 9, 10].

На рис. 1 представлены кривые напряжения вторичной обмотки трансформатора и выпрямленного напряжения при питании ТЭД от



**Рис. 1.** Кривые напряжения вторичной обмотки трансформатора (а) и выпрямленного напряжения (б) при питании тягового электрического двигателя от мостового неуправляемого преобразователя

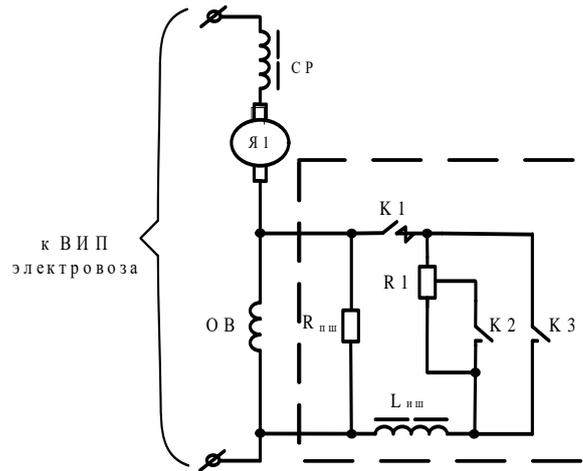
**Fig. 1.** Curves of the voltage of the secondary winding of the transformer (a) and the rectified voltage when (b) the traction electric motor is powered from the bridge uncontrolled converter

мостового неуправляемого преобразователя с учетом индуктивностей обмоток трансформатора, сглаживающего реактора [3, 10]. Рисунок поясняет их влияние на зависимости во времени кривых напряжений и токов цепей переменного и постоянного токов.

Кривые при плавном зонно-фазовом регулировании напряжения и токи будут выглядеть аналогично при минимальных углах открытия тиристоров преобразователя.

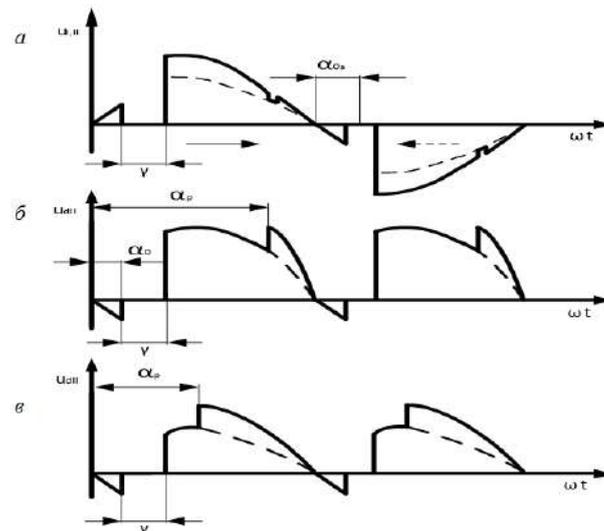
Штатная схема регулирования магнитного потока (возбуждения) тягового электрического двигателя представлена на рис. 2. Для реализации трех ступеней регулирования возбуждения необходимы три пневматических контактора, один из которых с дугогашением, резистор с тремя выводами, а также индуктивный шунт.

На рис. 3 представлены кривые выпрямленного напряжения на тяговом электрическом



**Рис. 2.** Электрическая принципиальная схема регулирования возбуждения тягового электрического двигателя электровоза

**Fig. 2.** Electrical schematic diagram regulation of excitation of traction electric motor electric locomotive



**Рис. 3.** Кривые напряжений при плавном зонно-фазовом регулировании напряжения секций 1 и 2 вторичной обмотки тягового трансформатора (а) и выпрямленного в начале второй зоны регулирования (б) и в конце ее (в)

**Fig. 3.** Voltage curves for smooth zone-phase voltage regulation of sections 1 and 2 of the secondary winding of the traction transformer (a) and rectified at the beginning of the second control zone (b) and at the end of it (c)

двигателе при плавном зонно-фазовом регулировании напряжения и напряжение на вторичной обмотке трансформатора [17].

Из рис. 3 видно, что в начале каждого полупериода к цепи выпрямленного тока прикладывается напряжение секций вторичной обмотки тягового трансформатора отрицательного значения. Напряжение прикладывается на отрезке  $0 - \alpha_0$ . В момент  $\alpha_0$  величина отрицательного напряжения составляет  $u = U_m \sin \omega t$ . Действующие значения напряжений секций вторичной обмотки трансформатора имеют номинальные значения 315 или 630 В. В момент  $\alpha_0$  напряжение достигает значения, достаточного для открытия тиристорных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя. Отсчет значения угла регулирования (открытия)  $\alpha_0$  тиристоров начинается в момент перехода напряжения сети через ноль и заканчивается при достижении потенциальных условий на плече, потенциальные условия отслеживаются автоматически. Вместе с тем значение угла, как показывает практика, составляет около 10 эл. град. Мгновенное напряжение на секции вторичной обмотки трансформатора при его действующем номинальном значении 315 В при этом принимает значение 77,4 В.

#### Предлагаемый способ плавного регулирования возбуждения

При выполнении работы [18] параллельно обмоткам возбуждения были постоянно подключены последовательно включенные резистор  $R_k$  сопротивлением 0,021 Ом и тиристор Т2-320. Тиристор открывали «пачкой» импуль-

сов в заданный наперед момент, в начале следующего полупериода питающего напряжения тиристор закрывался под действием потенциалов на элементах цепи постоянного тока ТЭД.

Полученный ранее неизвестный эффект позволяет сделать вывод, что возможно плавное РВ без применения искусственной коммутации для закрытия неуправляемых тиристоров.

Использованные ранее в работе [18] устройства позволяют реализовать указанный способ плавного регулирования магнитного потока ТЭД. Прототип устройства представлен на рис. 4.

В цепи тиристора регулирования возбуждения отсутствует ограничивающий резистор  $R_k$ , минимальный ток и  $\beta_{\min}$  будут обеспечены, в том числе и при пробое тиристора, сглаживающим реактором. При применении данного устройства позволит плавно регулировать намагничивающую силу ТЭД во всем диапазоне от  $\beta_0$  до  $\beta_{\min}$ . Количество контакторов уменьшится до одного, шунтирующий резистор с тремя выводами из цепи может быть исключен.

#### Выводы

1. Анализ электромагнитных процессов в цепях постоянного тока электровоза однофазно-постоянного тока показал, что отрицательное напряжение на выходе выпрямительно-инверторного преобразователя в начале полупериода питающего напряжения позволяет запереть неуправляемый тиристор, включенный параллельно обмотке возбуждения ТЭД, открытый управляющим воздействием в предыдущем полупериоде.

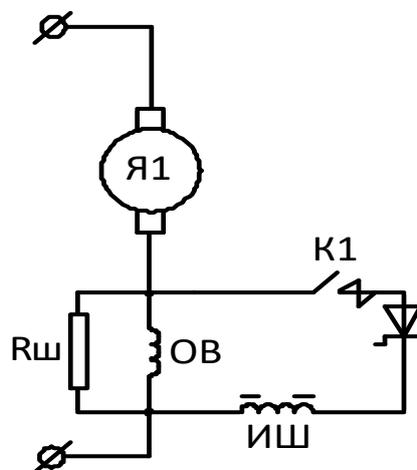


Рис. 4. Прототип устройства для плавного регулирования возбуждения

Fig. 4. Prototype device for modulating excitation control

2. Выявленное явление позволяет говорить о новом способе плавного регулирования магнитного потока ТЭД на электровозах однофазно-постоянного тока.

3. Представлен прототип устройства плавного РВ ТЭД на электровозах однофазно-переменного тока.

### Список литературы

1. Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : утв. ОАО «РЖД» №769/р от 17.04.2018.
2. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : утв. распоряжением Правительством РФ от 19.03.2019 г. № 466р.
3. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. М. : Транспорт, 1980. 431 с.
4. Плакс А.В. Система управления электрическим подвижным составом. М. : Маршрут, 2005. 360 с.
5. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Новочеркасск : 2007. В 2 т. Т. 1. 635 с.
6. Электровоз ВЛ80р : Руководство по эксплуатации. М. : Транспорт, 1985. 546 с.
7. Электровоз ВЛ85: Руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов, Н.Г. Пушкарев, Л.А. Позднякова и др. М. : Транспорт, 1992. 480 с.
8. Корягина Е.Е., Коскин О.А. Электрооборудование трамваев и троллейбусов. М. : Транспорт, 1982. 296 с.
9. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М. : Транспорт, 1988. 312 с.
10. Тихменев Б.Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями. М. : Транспорт, 1958. 277 с.
11. Евстафьев А.М. Электронные системы ослабления возбуждения тяговых двигателей электроподвижного состава: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2005. 135 с.
12. Мазнев А.С. Баранов В.А., Богданов А.А. Тяговые характеристики электровозов ВЛ10 в режиме усиленного возбуждения // Известия ПГУПС. 2007. № 2. С. 62–69.
13. Мазнев А.С., Шатнев О.И., Евстафьев А.М. Электронные системы регулирования возбуждения для электроподвижного состава // Вестник РГУПС, 2007. № 3. С. 12.
14. Калинин М.В. Электронные системы ослабления возбуждения ТД электровозов переменного тока // Известия ПГУПС. Современные технологии – транспорту, 2009. С. 19–29.
15. Мазнев А.С., Евстафьев А.М. Электронные системы управления для электроподвижного состава постоянного тока // Известия ПГУПС. Современные технологии – транспорту, 2007. С. 60–69.
16. Volchek T.V. Tomilov V.S., Varenov E.A. Proposals for Introduction of Modern Power Semiconductor Devices Into Converter-Fed Commutator Motor Locomotives of Russian Railways // Пром-Инжиниринг : материалы междунар. науч.-техн. конф. = 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. 2020.
17. Горбань В.Н., Донской А.Л., Шабалин Н.Г. Электронное оборудование электровоза ВЛ80Р: Ремонт и техническое обслуживание. М. : Транспорт, 1984. 184 с.
18. Макаров В.В. Разработка привода с независимым возбуждением и поосным распределением нагрузок для магистрального подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 1991. 193 с.

### References

1. Strategiya nauchno-tekhnicheskogo razvitiya kholdinga «RZHD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga) : utv. ОАО «RZHD» №769/r ot 17.04.2018. [White Book of JSC "Russian Railways" No. 769 / r dated 04/17/2018 "Strategy for the scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future until 2030"].
2. Dolgosrochnaya programma razvitiya ОАО «RZHD» do 2025 goda : utv. rasporyazheniyem Pravitel'stvom RF ot 19.03.2019 g. № 466r [Long-term development program of Russian Railways until 2025 (approved by the order of the Government of the Russian Federation of 19.03.2019, No. 466r)].
3. Tikhmenev B.N., Trakhtman L.M. Podvizhnoy sostav elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. Teoriya raboty elektrooborudovaniya. Elektricheskiye skhemy i apparaty [The rolling stock of electrified railways. Theory of work of electrical equipment. Electrical circuits and apparatus]. M.: Transport Publ., 1980. 431 p.
4. Plaks A.V. Sistema upravleniya elektricheskim podvizhnym sostavom [Electric rolling stock control system]. Moscow: Route Publ., 2005, 360 p.
5. Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Operation manual]. Novocherkassk, 2007, Vol. 1, 635 p.
6. Tushkanov B.A., Pushkarev N.G., Pozdnyakov L.A. et al. Elektrovoz VL85: Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electric locomotive VL80r: Operation manual]. Moscow: Transport Publ., 1985, 546 p.
7. Electric locomotive VL85: Operation manual / B.A. Tushkanov, N.G. Pushkarev, L.A. Pozdnyakova et al. M. : Transport, 1992. 480 p.
8. Koryagina E.E., Koskin O.A. Elektrooborudovaniye tramvayev i trolleybusov [Electrical equipment of trams and trolley-buses]. M.: Transport Publ., 1982, 296 p.
9. Tikhmenev B.N., Kuchumov V.A. Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with thyristor converters]. M.: Transport Publ., 1988, 312 p.

10. Tikhmenev B.N. Elektrovozy peremennogo toka so staticheskimi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with static converters]. Moscow: Transport Publ., 1958. 277 p.

11. Evstafiev A.M. Electronic systems for weakening the excitation of traction motors of electric rolling stock: dis. ... kand. tekhn. nauk [Elektronnyye sistemy oslableniya возбуждения тяговых двигателей электродвизного состава: Ph.D. (Engineering) diss.]. St. Petersburg, 2005. 135 p.

12. Maznev A.S., Baranov V.A., Bogdanov A.A. Tyagovyye kharakteristiki elektrovozov VL10 v rezhime usilennogo возбуждения [Traction characteristics of VL10 electric locomotives in enhanced excitation mode]. *Izvestia PGUPS [Izvestia PGUPS]*, 2007, No. 2, pp. 62–69.

13. Maznev A.S., Shatnev O.I., Evstafiev A.M. Elektronnyye sistemy regulirovaniya возбуждения dlya elektropodvizhnogo sostava [Electronic excitation control systems for electric rolling stock]. *Vestnik RGUPS [Bulletin of RGUPS]*, 2007, No. 3, pp. 12.

14. Kalinin M.V. Elektronnyye sistemy oslableniya возбуждения TD elektrovozov peremennogo toka [Electronic systems for weakening the excitation of TD of AC electric locomotives]. *Izvestia PGUPS. Sovremennyye tekhnologii – transportu [Izvestia PGUPS. Modern technologies for transport]*, 2009, pp 19–29.

15. Maznev A.S., Evstafiev A.M. Elektronnyye sistemy upravleniya dlya elektropodvizhnogo sostava postoyannogo toka [Electronic control systems for DC electric rolling stock]. *Izvestia PGUPS. Sovremennyye tekhnologii – transportu [Izvestia PGUPS. Modern technologies for transport]*, 2007, pp. 60–69.

16. Volchek T.V., Tomilov V.S., Barenov E.A. Proposals for Introduction of Modern Power Semiconductor Devices Into Converter-Fed Commutator Motor Locomotives of Russian Railways. *Prom-Engineering: Materials. int. scientific and technical conf. (eng. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM)*, 2020.

17. Gorban V.N., Donskoy A.L., Shabalin N.G. Elektronnoye oborudovaniye elektrovoza VL80R: Remont i tekhnicheskoye obsluzhivaniye [Electronic equipment of the VL80R electric locomotive: Repair and maintenance]. M.: Transport Publ., 1984. 184 p.

18. Makarov V.V. Razrabotka privoda s nezavisimym возбуждением i poosnym raspredeleniyem nagruzok dlya magistral'nogo podvizhnogo sostava: dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of a drive with independent excitation and axial distribution of loads for main-line rolling stock: Ph.D. (Engineering) diss.]. Omsk, 1991. 193 p.

#### Информация об авторах

**Макаров Виктор Васильевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры электродвизного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: makarov\_vv@irgups.ru.

**Семченко Виктор Васильевич** – канд. техн. наук, генеральный директор АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», г. Красноярск, e-mail: office@dcv.ru.

#### Information about the authors

**Viktor V. Makarov** – Associate Professor of the Department Electric rolling stock, Irkutsk State University of Railways, Irkutsk, e-mail: makarov\_vv@irgups.ru.

**Viktor V. Semchenko** – Candidate of Technical Sciences, General Director of «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», г. Красноярск, e-mail: office@dcv.ru.

## Моделирование режимов систем электроснабжения стационарных объектов железных дорог

А.В. Крюков<sup>1,2</sup>✉, И.А. Любченко<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ and\_kryukov@mail.ru

### Резюме

Для обеспечения железнодорожных перевозок необходима развитая инфраструктура, включающая предприятия по обслуживанию и ремонту подвижного состава, путевого хозяйства, а также объекты сигнализации, централизации, автоблокировки и связи. Функционирование этой инфраструктуры невозможно без надежного электрообеспечения, поэтому на многих тяговых подстанциях железных дорог переменного тока сооружаются распределительные устройства 6-10-35 кВ, осуществляющие электроснабжение стационарных потребителей. Из-за влияния однофазной тяговой нагрузки в системах электроснабжения этих потребителей может возникать значительная несимметрия, уровни которой часто превышают допустимые нормы, что приводит к негативным эффектам, заключающимся в росте потерь и сокращении сроков службы электрооборудования. Необходима разработка и внедрение средств для улучшения качества электроэнергии, выбор которых в условиях проводимой в настоящее время цифровизации электроэнергетики должен осуществляться на основе компьютерных технологий. Для использования такого подхода нужны цифровые модели системы электроснабжения, корректно учитывающие все их важные аспекты. Такие модели могут быть реализованы на базе методов и средств, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения. В основу этих методов положен подход, использующий фазные координаты, позволяющие получить наиболее близкое к физике процессов формализованное описание режимов трехфазно-однофазных электрических сетей. В статье представлены результаты исследований, направленных на разработку моделей систем электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта; при этом наибольшее внимание уделялось объектам сигнализации, централизации, автоблокировки и связи. Для моделирования применялся программный комплекс «Fazonord». С целью детального исследования режимов моделирование проведено для следующих вариантов: нагрузки на шинах 0,4 кВ подключались на фазные или линейные напряжения; выполнялась вариация протяженности питающих линий электропередачи 10 кВ; имитировались однофазные замыкания на землю; варьировались нагрузки трансформатора собственных нужд и потребителей, подключенных к шинам 0,4 кВ подстанций стационарных объектов; осуществлялось изменение тяговой нагрузки в целях определения ее влияния на систему электроснабжения; рассматривалось три вида нагрузок – трехфазная симметричная, двухфазная и однофазная; проводилось варьирование протяженности питающих линий электропередачи.

### Ключевые слова

железнодорожный транспорт, линия электропередачи, системы электроснабжения стационарных потребителей, моделирование

### Для цитирования

Крюков А. В. Моделирование режимов систем электроснабжения стационарных объектов железных дорог / А. В. Крюков, И. А. Любченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 195–210. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).195-210

### Информация о статье

поступила в редакцию: 21.10.2021, поступила после рецензирования: 29.10.2021, принята к публикации: 10.11.2021

### Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZZS-2020-0039).

## Modeling of power supply systems of stationary railway objects

A. V. Kryukov<sup>1,2</sup>✉, I. A. Lyubchenko<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ and\_kryukov@mail.ru

### Abstract

To ensure rail transportation, a developed infrastructure is needed, including enterprises for the maintenance and repair of rolling stock, track facilities, as well as signaling, centralization, automatic blocking and communication facilities. The functioning of

this infrastructure is impossible without a reliable electricity supply. Therefore, at many traction substations of alternating current railways, switchgears of 6-10-35 kV are being built, supplying power to stationary consumers, which include the facilities listed above. Due to the influence of a single-phase traction load in the power supply systems (PSS) of these consumers, significant unbalance may occur, the levels of which often exceed the permissible rating values, resulting in such negative effects as loss increase and a reduction in the operation life of electrical equipment. Therefore means to improve the quality of electricity have to be developed and introduced, the choice of which in the current digitalization of the electric power industry should be based of computer technologies. To use this approach, digital models of PSS are required correctly taking into account all the important aspects. Such models can be implemented on the basis of methods and tools developed in the Irkutsk State University of Railways. These are based on an approach using phase coordinates, which make it possible to obtain a formalized description of the modes of three-phase - single-phase electrical networks closest to the physics of the processes in question. The article presents the results of studies aimed at developing models of PSS for stationary objects of railway transport; with the primary attention paid to the objects of signaling, centralization, automatic blocking and communication. The Fazonord software package was used for modeling. For a detailed study of the modes, simulation was carried out for the following options: loads on 0.4 kV buses were connected to phase or line voltages; variation of the length of 10 kV power transmission lines was performed; simulated single-phase-to-earth faults; the transformer loads for auxiliary needs and consumers connected to the 0.4 kV buses of substations of stationary objects varied; the traction load was changed in order to determine its effect on the PSS; three types of loads were considered: three-phase symmetrical, two-phase and single-phase; the length of the power transmission lines was varied.

### Keywords

railway transport, power transmission line, power supply systems for stationary consumers, modeling

### For citation

Kryukov A. V., Lyubchenko I. A. Modelirovanie rezhimov sistem elektrosnabzheniya stacionarnykh ob"ektov zheleznykh dorog [Modeling of power supply systems of stationary railway objects]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 195–210. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).195-210

### Article Info

Received: 21.10.2021, Revised: 29.10.2021, Accepted: 10.11.2021

### Acknowledgements

The research was carried out with financial support under a state assignment grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZZS-2020-0039).

### Введение

Функционирование стационарных объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта невозможно без надежного обеспечения электроэнергией. Поэтому на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока сооружаются распределительные устройства 6-10-35 кВ, осуществляющие электроснабжение стационарных потребителей, к которым относятся предприятия по обслуживанию и ремонту подвижного состава, путевого хозяйства, а также объекты сигнализации, централизации, автоблокировки (СЦБ) и связи.

Вопросам изучения и совершенствования систем электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта посвящено значительное число работ, часть из которых приведена в библиографическом списке [1–35]. Публикации [1–13] посвящены исследованию качества электроэнергии в системах электроснабжения (СЭС) нетяговых потребителей и разработке методов и средств по его улучшению. В статьях [14–20] и книге [21] предлагаются методы моделирования таких систем. Резуль-

таты комплексных исследований СЭС нетяговых потребителей приведены в монографиях [22–24]. Решению задач повышения надежности электроснабжения нетяговых потребителей посвящены работы [25, 26]. Актуальные вопросы использования нетрадиционных источников энергии рассматриваются в статьях [27, 28]. Задачи обеспечения электромагнитной совместимости в СЭС стационарных объектов транспорта рассмотрены в [29, 30], а вопросы повышения энергетической эффективности сетей нетяговых потребителей – в работах [31–35].

Из-за влияния однофазной тяговой нагрузки в СЭС стационарных потребителей может возникать значительная несимметрия, уровни которой часто превышают допустимые нормы, что приводит к негативным эффектам, заключающимся в росте потерь и сокращении сроков службы электрооборудования. Необходимо разработка и внедрение средств для улучшения качества электроэнергии, выбор которых в условиях проводимой в настоящее время цифровизации электроэнергетики должен осуществляться на основе компьютерных

технологий. Для использования такого подхода нужны цифровые модели СЭС, корректно учитывающие все их важные аспекты. Такие модели могут быть реализованы на базе методов и средств, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения [36, 37]. В основу этих методов положен подход, использующий фазные координаты, позволяющие получить наиболее близкое к физике описание процессов формализованное описание режимов трехфазно-однофазных электрических сетей.

Обобщенная схема электроснабжения стационарных (нетяговых) потребителей, включающая наиболее распространенные варианты конструктивного исполнения питающих линий электропередачи, показана на рис. 1. На этой схеме представлены следующие варианты линий электропередачи (ЛЭП):

- ЛЭП 10 кВ, подключенная к тяговой подстанции (ТП) через трансформатор собственных нужд (ТСН);
- ЛЭП 10 кВ, присоединенная к районной обмотке тягового трансформатора (ТТ);
- ЛЭП 10 кВ продольного электроснабжения, размещенная на опорах контактной сети (КС);
- линия 27,5 кВ «два провода – рельс» (ДПР).

Подключение через ТСН используется в СЭС объектов СЦБ для гальванической развязки с рельсовыми цепями. ЛЭП, смонтированные на опорах КС, подвержены значительному электрическому и магнитному влиянию элек-

тромагнитно неуравновешенной тяговой сети (ТС). В отличие от ЛЭП 10 кВ, имеющих пофазно однородную структуру, линии ДПР отличаются значительной неоднородностью. Кроме того, в этих ЛЭП часть тока протекает через землю.

Все представленные варианты СЭС характеризуются подключением питающих линий 6-10-25 кВ к ТТ. В результате влияния резко переменной тяговой нагрузки создаются значительные отклонения напряжений, несимметрия и гармонические искажения. Ниже представлены результаты исследований СЭС стационарных объектов железнодорожного транспорта, направленных на создание их компьютерных моделей с целью определения режимов и разработки мероприятий по улучшению качества электроэнергии.

### Методика моделирования

В наиболее общей постановке задачу определения режимов СЭС можно представить как функциональное преобразование следующего вида:

$$\mathbf{A} : \mathbf{D} \Rightarrow \mathbf{X}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}$  – нелинейный оператор;  $\mathbf{D} = \mathbf{S} \cup \mathbf{Y}$  – входные данные;  $\mathbf{X}$  – вектор параметров, характеризующих режим СЭС;  $\mathbf{S}$  – параметры, описывающие структуру и характеристики элементов СЭС;  $\mathbf{Y}$  – параметры, которые характеризуют генераторы и нагрузки.

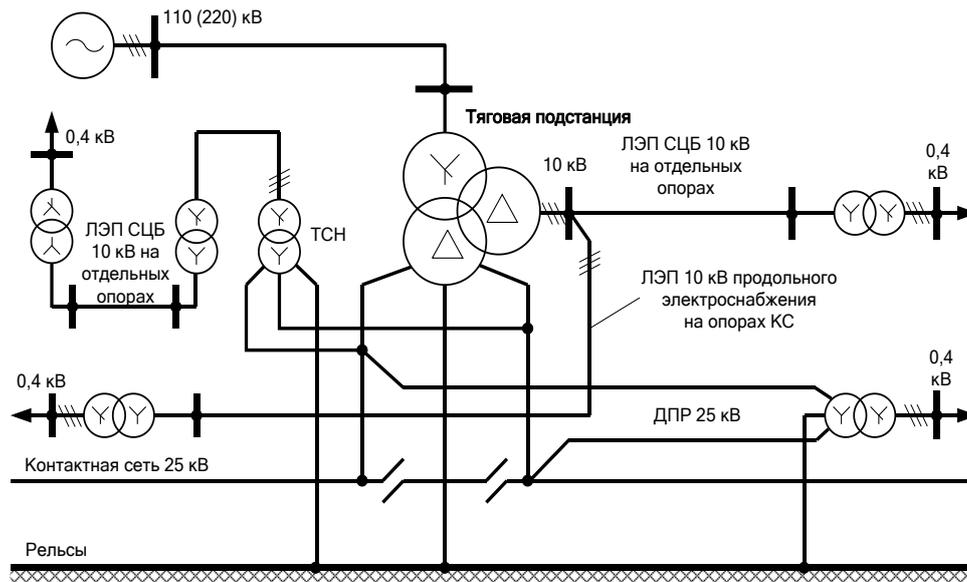


Рис. 1. Электроснабжение стационарных объектов железнодорожного транспорта  
Fig. 1. Power supply of railway stationary objects

Параметры  $X$ , отвечающие преобразованию (1), могут быть определены из решения следующей нелинейной системы уравнений:

$$F(X, Y) = 0, \quad (2)$$

где  $X$  – вектор узловых напряжений в декартовых  $(U_k', U_k'')$  или полярных  $(U_k, \delta_k)$  координатах;  $Y$  – вектор, компонентами которого являются активные  $P_k$  и реактивные  $Q_k$  мощности генераторов и нагрузок.

Для решения задач моделирования режимов СЭС стационарных объектов транспорта для формирования уравнений (2) целесообразно использовать подход, который базируется на применении фазных координат [36]; при этом используются полносвязанные решетчатые схемы замещения (РСЗ):

$$TEC: hub \cup con, \forall i, j \in hub \rightarrow con_{i,j} \subset con,$$

где  $TEC$  – обозначение РСЗ;  $hub$  – множество узлов РСЗ;  $con$  – множество ветвей РСЗ.

Множество силовых элементов СЭС, определяющих энергетические потоки в сетях, можно представить как объединение двух подмножеств:

$$PSS = Power \cup Conv.$$

В первое из них входят воздушные и кабельные ЛЭП, а также ТС. Второе – образуют трансформаторы различных конструкций.

Любые из перечисленных компонентов  $PSS$  можно обобщенно рассматривать как статические многопроводные элементы, состоящие из набора проводов или обмоток с электромагнитными связями [36]. Описанный подход к моделированию режимов СЭС реализован в программном комплексе «Fazonord». Цифровые модели СЭС, реализованные в фазных координатах, могут эффективно использоваться при разработке киберфизических систем электроснабжения стационарных объектов [38].

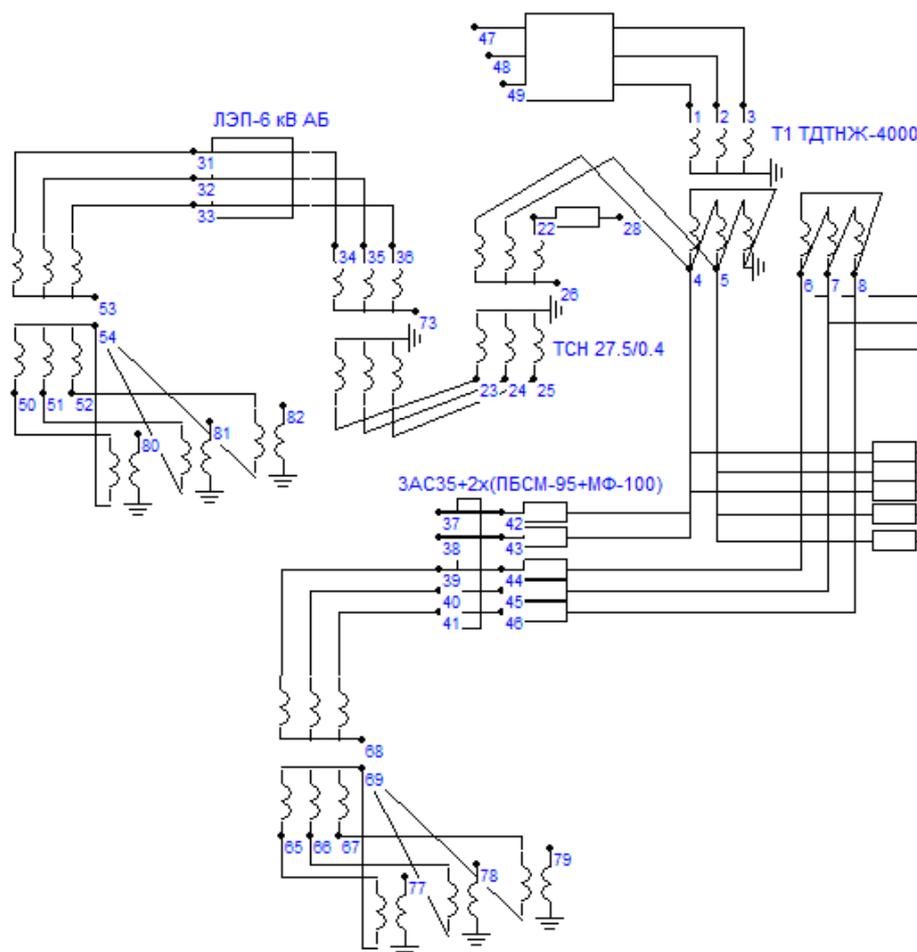


Рис. 2. Фрагмент изображения расчетной модели в программном комплексе «Fazonord»

Fig. 2. Partial picture of a design model in the “Fazonord” software complex

### Результаты моделирования

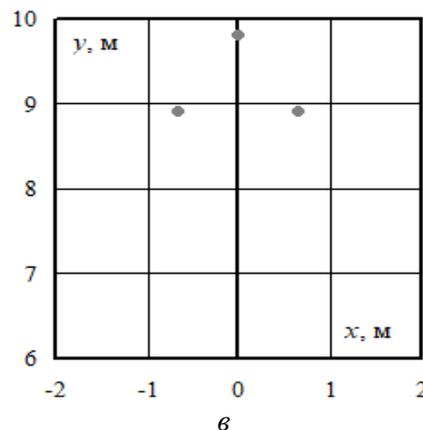
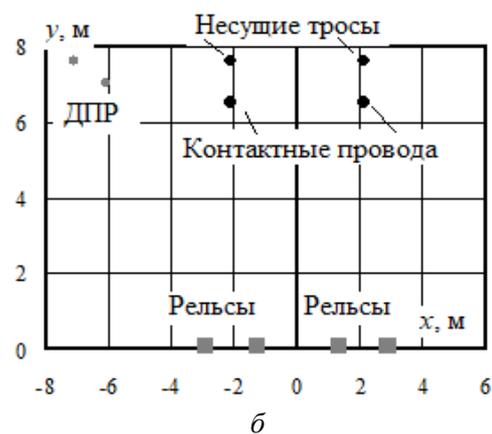
Моделирование режимов СЭС стационарных объектов (см. рис. 1) осуществлялось в программном комплексе «Fazonord» на основе модели, фрагмент которой показан на рис. 2.

На этой схеме представлены модели следующих элементов СЭС:

- ТТ ТДТНЖ-40000/230/27,5/11;
- ЛЭП 10 кВ, смонтированная на отдельных опорах и подключенная к ТП через ТСН;
- ЛЭП 10 кВ, присоединенная к районной обмотке ТТ и также расположена на отдельных опорах;
- ЛЭП 10 кВ продольного электроснабжения, размещенная на опорах КС и подключенной к районной обмотке ТТ;
- линии ДПР 27,5 кВ.

На рис. 3 показаны координаты расположения проводов рассматриваемых ЛЭП.

Для детального исследования режимов



**Рис. 3.** Координаты расположения проводов:

- a* – линия электропередачи продольного электроснабжения; *б* – линия «два провода – рельс»;  
*в* – линия электропередачи 10 кВ на отдельных опорах

**Fig. 3.** Wiring coordinates:

- a* – transmission line for longitudinal power supply; *б* – “two wires-rail” line;  
*в* – 10kv power line on separate poles

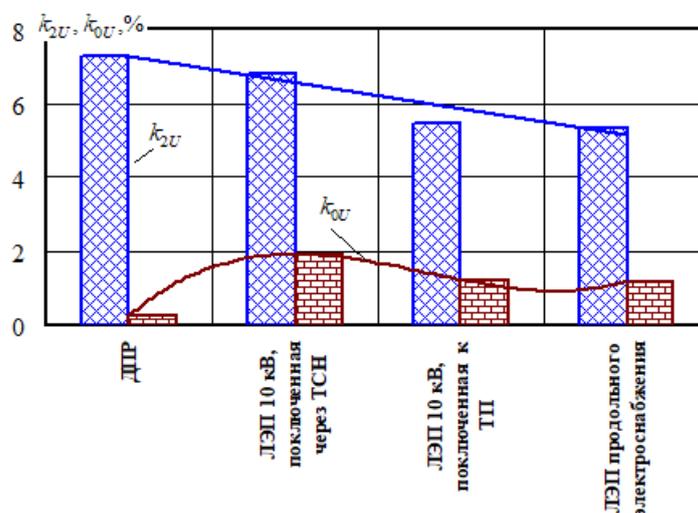
в табл. 1 и на рис. 4–21. На рис. 4 – результаты определения коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям на шинах 0,4 кВ подстанций, питающих стационарные объекты.

Наибольшей несимметрией по нулевой последовательности характеризуется схема с ЛЭП, подключенной через ТСН. Это связано со значительным суммарным сопротивлением передачи (табл. 1), вызванным тройной трансформацией 27,5/0,4 кВ, 0,4/10(6) кВ и 10(6)/0,4 кВ. Наименьшая величина  $k_{0U}$  имеет место в схеме с ЛЭП ДПР, что связано с электромагнитным влиянием КС.

На рис. 5, 6 приведены результаты расчета коэффициентов несимметрии на шинах 0,4 кВ

при изменении расстояний до тяговой подстанции. На этих шинах задавались симметричные нагрузки  $40 + j20$  кВ·А на фазу.

Вследствие повышения электромагнитного влияния ТС при возрастании длины сближения наибольший рост коэффициента несимметрии  $k_{2U}$  с увеличением расстояния  $x$  наблюдается в ЛЭП продольного электроснабжения и ДПР. Наименьшая интенсивность увеличения этого параметра имеет место в ЛЭП, которая подключена через ТСН. Это связано с тем, что сопротивление  $X_C$  (табл. 1) в данной сети определяется в основном сопротивлениями трансформаторов.



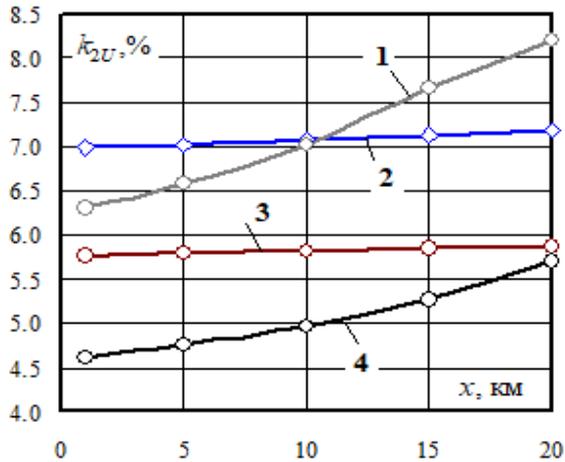
**Рис. 4.** Коэффициенты несимметрии на шинах 0,4 кВ подстанций сигнализации, централизации, автоблокировки (длина линии электропередачи – 10 км)

**Fig. 4.** Unbalance factors on 0,4 kv buses of signaling, centralization and automatic blocking substations (length of power line 10 km)

**Таблица 1.** Токи  $I$  и реактансы  $X_C$  короткого замыкания контактной сети на шинах 0,4 кВ подстанций стационарных объектов, %

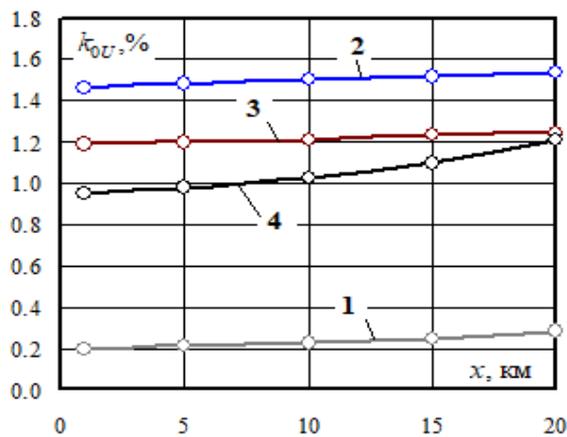
**Table 1.** Currents  $I$  and reactances  $X_C$  of an overhead short circuit on 0,4 kV substations of stationary objects, %

Параметр	Точка контроля параметра	Вариант линии электропередачи			
		10 кВ, подключенная через трансформатор собственных нужд	Продольного электроснабжения	10 кВ, подключенная к районной обмотке	Линия «два провода – рельс»
$I, A$	Фаза А	1 774	4 335	4 322	4 236
	Фаза В	1 929	4 662	4 708	4 655
	Фаза С	1 760	4 384	4 348	4 080
$X_C, \text{ Ом}$	Фаза А	0,21	0,09	0,09	0,09
	Фаза В	0,20	0,08	0,08	0,08
	Фаза С	0,22	0,09	0,09	0,09
Среднее значение $X_C, \text{ Ом}$	–	0,21	0,09	0,09	0,09
$S_{КЗ}, \text{ МВ} \cdot \text{ А}$	–	0,69	1,69	1,69	1,64



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента несимметрии по обратной последовательности  $k_{2U}$  от расстояния  $x$  до питающей подстанции: 1 – линия «два провода – рельс»; 2 – ЛЭП 10 кВ, подключенная через трансформатор собственных нужд; 3 – ЛЭП 10 кВ, подключенная к районной обмотке тягового трансформатора; 4 – ЛЭП 10 кВ продольного электроснабжения

**Fig. 5.** Dependence of unbalance factor by reverse sequence  $k_{2U}$  on distance  $x$  to the feeding substation; 1 – “two wires-rail” line; 2 – 10 kV power line connected through the house transformer; 3 – 10 kV power line connected to the regional winding of the traction transformer; 4 – 10 kV power line of the longitudinal power supply

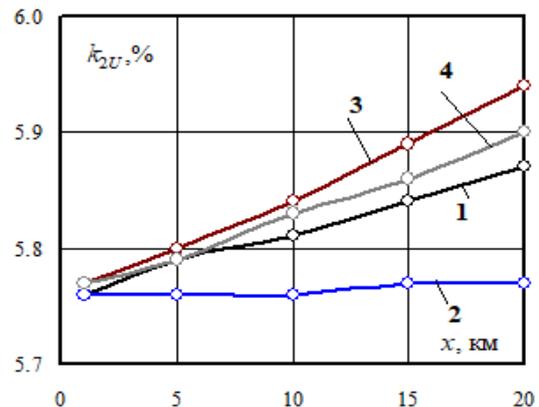


**Рис. 6.** Зависимость коэффициента несимметрии по нулевой последовательности  $k_{0U}$  от расстояния до питающей подстанции (обозначения аналогичны рис. 5)

**Fig. 6.** Dependence of unbalance factor by zero sequence  $k_{0U}$  on the distance to the feeding substation (designation same as on fig. 5)

Уровни несимметрии по нулевой последовательности в линиях, смонтированных на отдельных опорах, мало зависят от  $x$ . Увеличение  $k_{0U}$  в ЛЭП ДПР и продольного электроснабжения (ПЭ) объясняется электромагнитным влиянием ТС.

На рис. 7–10 приведены результаты моделирования режимов однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в линиях 10 кВ. Такие ЛЭП, как правило, работают с изолированной нейтралью, поэтому изучение влияния ОЗЗ на показатели качества электроэнергии имеет практическую значимость. Результаты моделирования ОЗЗ в ЛЭП, подключенной к районной обмотке ТТ, приведены на рис. 7, 8. Представленные результаты свидетельствуют о том, что однофазные замыкания на землю мало влияют на уровни несимметрии.



**Рис. 7.** Зависимость коэффициента несимметрии  $k_{2U}$  от координаты  $x$  для линии электропередачи, подключенной к районной обмотке тягового трансформатора:

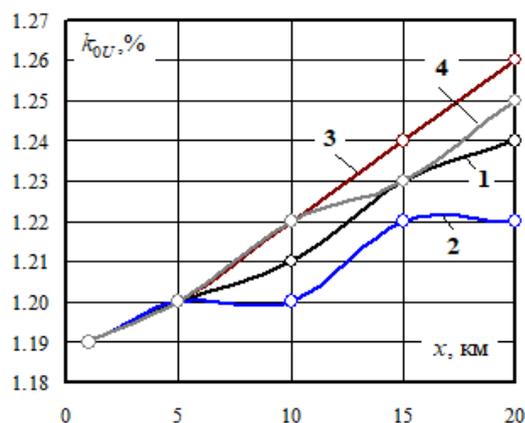
1 – замыканий нет; 2 – замыкание фазы А; 3 – замыкание фазы В; 4 – замыкание фазы С

**Fig. 7.** Dependence of unbalance factor  $k_{2U}$  on coordinate  $x$  for the power supply line connected to the regional winding of the traction transformer: 1 – no short circuits; 2 – phase A short circuit; 3 – phase B short circuit; 4 – phase C short circuit

Исключение составляет режим замыкания фазы В, при котором коэффициент  $k_{2U}$  не меняется с ростом координаты  $x$ , зависимость  $k_{0U} = k_{0U}(x)$  приобретает выраженный нелинейный характер с двумя экстремумами.

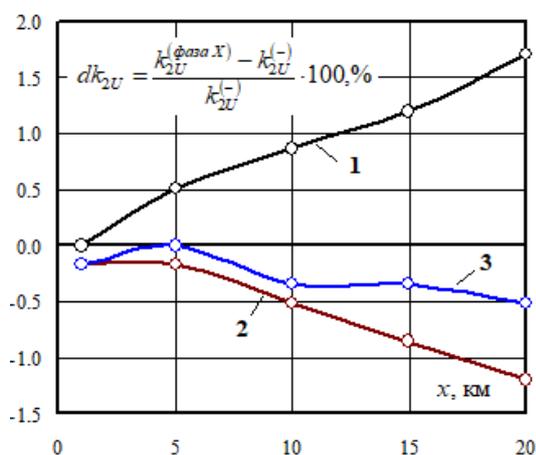
При консольном подключении данной ЛЭП расстояние  $x$  может значительно увеличи-

ваться и влияние замыканий на землю будет более заметным.



**Рис. 8.** Зависимость коэффициента несимметрии  $k_{0U}$  от координаты  $x$  для линии электропередачи, подключенной к районной обмотке тягового трансформатора (обозначения аналогичны рис. 7)

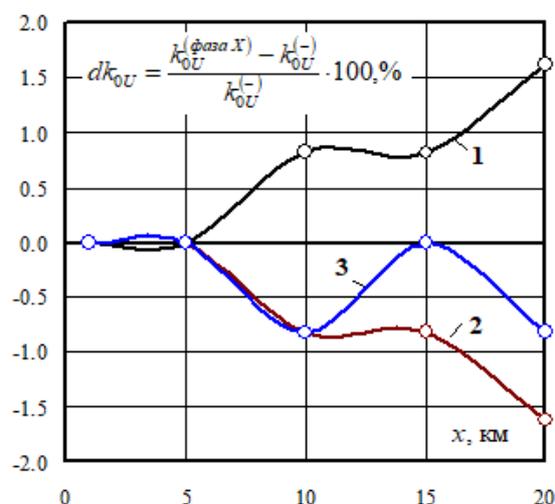
**Fig. 8.** Dependence of unbalance factor  $k_{0U}$  on coordinate  $x$  for the power supply line connected to the regional winding of the traction transformer: (designation same as on fig. 7)



**Рис. 9.** Отличия в коэффициентах  $k_{2U}$  при однофазных замыканиях на землю:

$k_{2U}^{(фаза X)}$  – коэффициенты несимметрии при замыкании на землю фазы  $X$ ,  $X = \overline{A, B, C}$ ;  $k_{2U}^{(-)}$  – коэффициент несимметрии при отсутствии замыканий (обозначения аналогичны рис. 7)

**Fig. 9.** Difference in the  $k_{2U}$  factors under single-phase ground short circuits:  $k_{2U}^{(фаза X)}$  – unbalance factors under ground short circuit of phase  $X$   $X = \overline{A, B, C}$ ;  $k_{2U}^{(-)}$  – unbalance factor with no short circuits (designations same as on fig. 7)



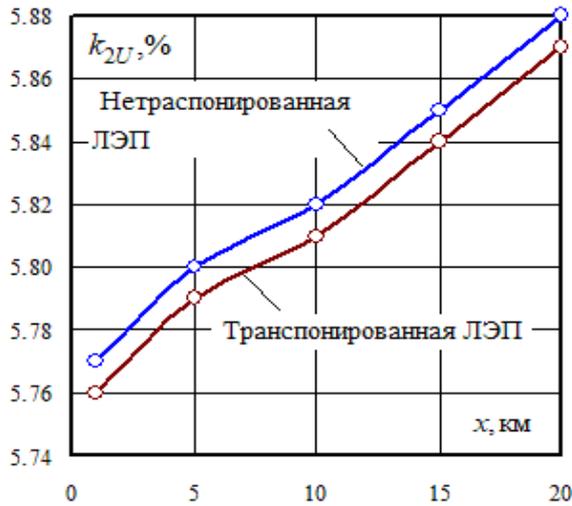
**Рис. 10.** Отличия в коэффициентах  $k_{0U}$  при однофазных замыканиях на землю:

$k_{0U}^{(фаза X)}$  – коэффициенты несимметрии при замыкании на землю фазы  $X$ ,  $X = \overline{A, B, C}$ ;  $k_{0U}^{(-)}$  – коэффициент несимметрии при отсутствии замыканий (обозначения аналогичны рис. 7)

**Fig. 10.** Difference in factors  $k_{0U}$  under single phase ground short circuit:  $k_{0U}^{(фаза X)}$  – unbalance factors under phase  $X$  ground short circuit.  $X = \overline{A, B, C}$ ;  $k_{0U}^{(-)}$  – unbalance factor with no short circuits (designation same as on fig. 7)

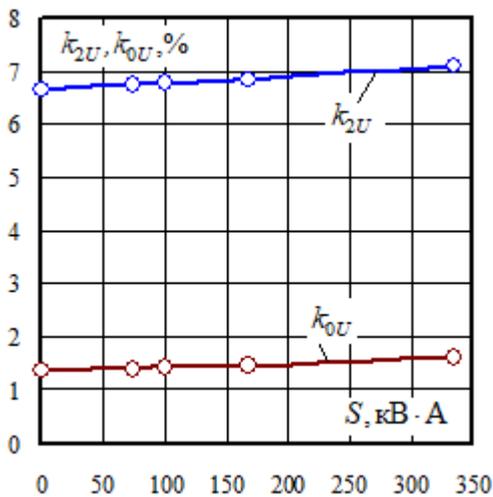
Транспозиция проводов в ЛЭП, питающих стационарные объекты, применяется в основном для снижения электромагнитного влияния между смежными ЛЭП и уменьшения наведенных напряжений на линиях связи. Однако вопрос о влиянии транспозиции на несимметрию в СЭС объектов СЦБ остается недостаточно изученным. Результаты моделирования для ЛЭП 10 кВ, подключенной к районной обмотке ТТ, показаны на рис. 11. Из него можно сделать вывод, что транспозиция этой ЛЭП незначительно влияет на коэффициент несимметрии по обратной последовательности.

Результаты моделирования несимметричных режимов при вариации нагрузки ТСН приведены на рис. 12, 13. Нагрузка ТСН варьировалась в диапазоне от холостого хода до величины 335 кВ·А, что соответствовало коэффициенту загрузке, равному 84 %.



**Рис. 11.** Зависимость коэффициента несимметрии  $k_{2U}$  от расстояния до питающей тяговой подстанции

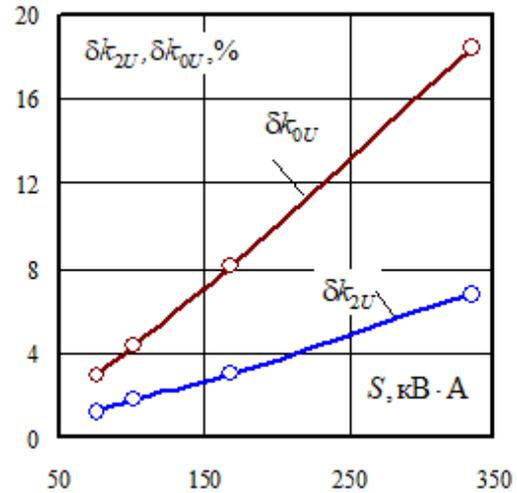
**Fig. 11.** Dependence of the unbalance factor  $k_{2U}$  on the distance to the feeding traction substation



**Рис. 12.** Зависимость коэффициентов несимметрии от нагрузки трансформатора собственных нужд

**Fig. 12.** Dependence of the unbalance factors on the house transformer load

Полученные результаты показывают, что нагрузка ТСН заметно влияет на величину коэффициента несимметрии по нулевой последовательности на шинах 0,4 кВ; отличие этого коэффициента при нагрузке 335 кВ·А от режима холостого хода достигает 18 %; влияние рассматриваемого фактора на коэффициент  $k_{2U}$  значительно меньше и составляет при обозначенной нагрузке примерно 7 %.



**Рис. 13.** Зависимость параметров  $\delta k_{2U}, \delta k_{0U}$  от нагрузки трансформатора собственных нужд:

$$\delta k_{2U} = \frac{k_{2U} - k_{2U}^{(0)}}{k_{2U}^{(0)}} \cdot 100; \quad \delta k_{0U} = \frac{k_{0U} - k_{0U}^{(0)}}{k_{0U}^{(0)}} \cdot 100;$$

$k_{2U}, k_{0U}$  – коэффициенты несимметрии при нагрузке  $S$ ;  $k_{2U}^{(0)}, k_{0U}^{(0)}$  – коэффициенты несимметрии при нагрузке  $S = 0$

**Fig. 13.** Dependence of the parameters  $\delta k_{2U}, \delta k_{0U}$  on the house transformer load:

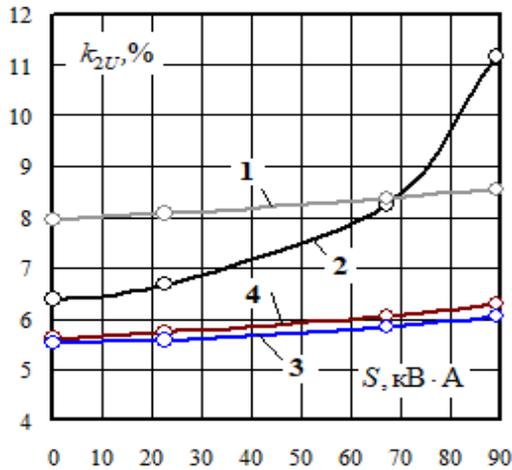
$$\delta k_{2U} = \frac{k_{2U} - k_{2U}^{(0)}}{k_{2U}^{(0)}} \cdot 100; \quad \delta k_{0U} = \frac{k_{0U} - k_{0U}^{(0)}}{k_{0U}^{(0)}} \cdot 100; \quad k_{2U},$$

$k_{0U}$  – unbalance factors under the load  $S$ ;

$k_{2U}^{(0)}, k_{0U}^{(0)}$  – unbalance factors under the load  $S=0$

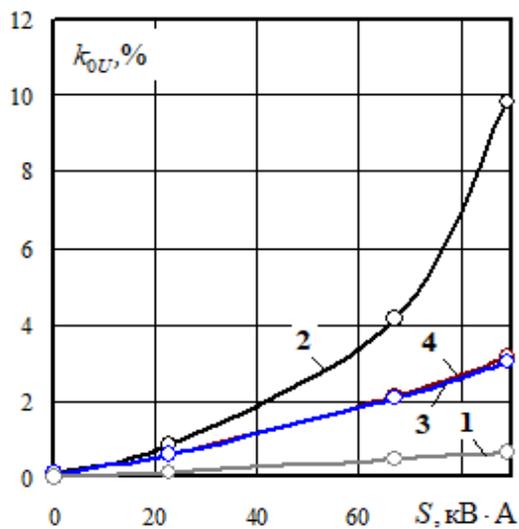
Для оценки влияния нагрузок стационарных объектов на параметры несимметрии выполнено моделирование при изменении их величин в диапазоне от холостого хода до значения 90 кВ·А, что соответствует допустимой перегрузке трансформатора на 7 % от номинала. Длины ЛЭП приняты равными 10 км (рис. 14, 15).

Приведенные результаты дают возможность сделать вывод о заметном влиянии нагрузок 0,4 кВ на уровни несимметрии по обратной и нулевой последовательностям. Например, для подстанции, питающейся через ТСН, коэффициент несимметрии  $k_{2U}$  увеличивается с 6,4 до 11 %; величина  $k_{0U}$  повышается от нуля до 10 %.



**Рис. 14.** Зависимость коэффициента несимметрии  $k_{2U}$  от нагрузки объектов сигнализации, централизации, автоблокировки (обозначения аналогичны рис. 5)

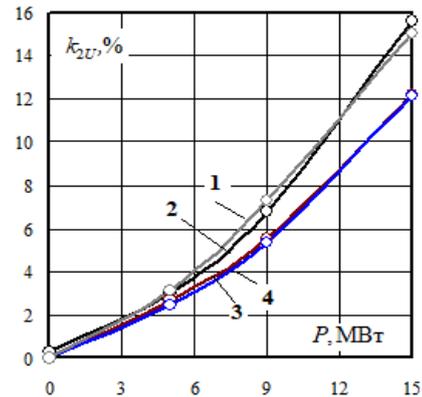
**Fig. 14.** Dependence of the unbalance factor  $k_{2U}$  on signaling, centralization and automatic blocking objects' loading (designation same as on fig. 5)



**Рис. 15.** Зависимость коэффициента несимметрии  $k_{0U}$  от нагрузки объектов сигнализации, централизации, автоблокировки (обозначения аналогичны рис. 5)

**Fig. 15.** Dependence of the unbalance factor  $k_{0U}$  on signaling, centralization and automatic blocking objects' loading (designation same as on fig. 5)

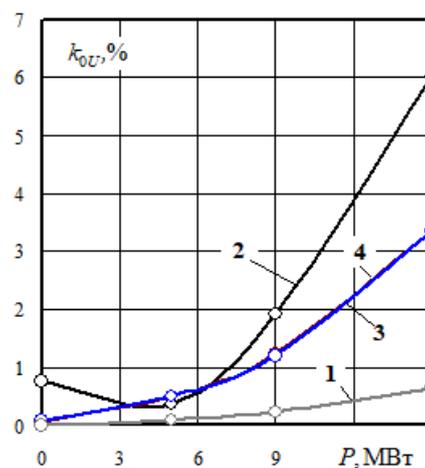
Для изучения влияния тяговой нагрузки на несимметрию напряжений шин 0,4 кВ выполнена серия расчетов при вариации суммарной тяговой нагрузки при коэффициенте реактивной мощности  $\text{tg}\varphi = 1$  (рис. 16, 17).



**Рис. 16.** Зависимость коэффициента несимметрии  $k_{2U}$  от тяговой нагрузки (обозначения аналогичны рис. 5)

**Fig. 16.** Dependence of the unbalance factor  $k_{2U}$  on traction load (designation same as on fig. 5)

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что имеет место существенный рост (до 15 % для ЛЭП ДПР и линии, подключенной через ТСН) коэффициента  $k_{2U}$  при увеличении суммарной тяговой нагрузки от 0 до 15 МВт при коэффициенте реактивной мощности, равном единице. Рост величины  $k_{0U}$  значительно меньше и достигает для ЛЭП, подключенной через ТСН, 6 %.

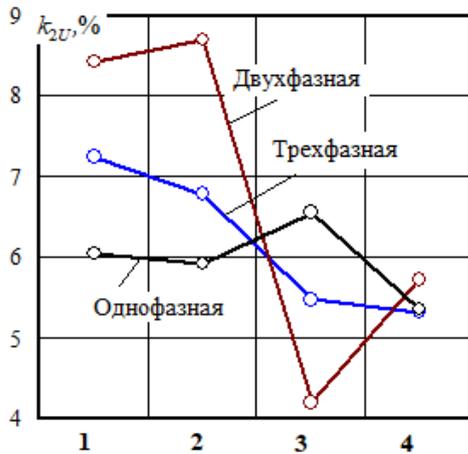


**Рис. 17.** Зависимость коэффициента несимметрии  $k_{0U}$  от тяговой нагрузки (обозначения аналогичны рис. 5)

**Fig. 17.** Dependence of the unbalance factor  $k_{0U}$  on traction load (designation same as on fig. 5)

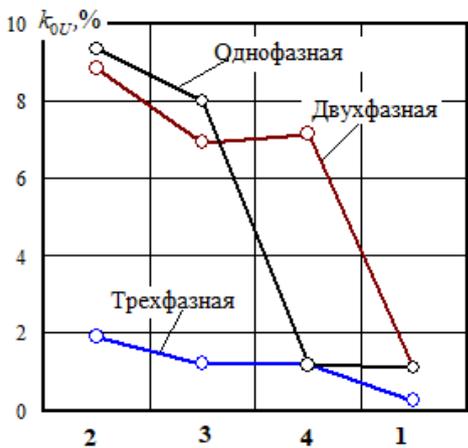
Для изучения влияния характера нагрузки стационарных объектов выполнены расчеты при симметричных и несимметричных нагрузках. При этом кроме трехфазных нагрузок рас-

сматривались двухфазные и однофазные. Длины ЛЭП приняты равными 10 км. Результаты моделирования показаны на рис. 18 и 19.



**Рис. 18.** Коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности на шинах 0,4 кВ подстанций сигнализации, централизации, автоблокировки

**Fig. 18.** Voltage unbalance factors by reverse sequence 0,4kV buses of signaling, centralization and automatic blocking substations



**Рис. 19.** Коэффициенты несимметрии по нулевой последовательности на шинах 0,4 кВ подстанций сигнализации, централизации, автоблокировки

**Fig. 19.** Voltage unbalance factors by zero sequence 0,4kV buses of signaling, centralization and automatic blocking substations

Представленные графики построены при следующих соотношениях суммарной нагрузки:

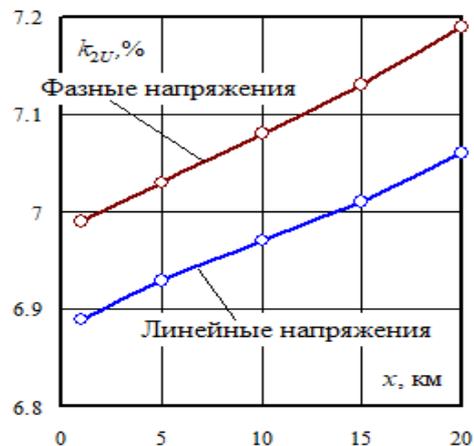
$$S_2 = \frac{2}{3} S_3;$$

$$S_1 = \frac{1}{3} S_3,$$

где  $S_3$ ,  $S_2$ ,  $S_1$  – соответственно трехфазная симметричная, двухфазная и однофазная нагрузки;  $S_3 = 40 + j20$  кВ·А.

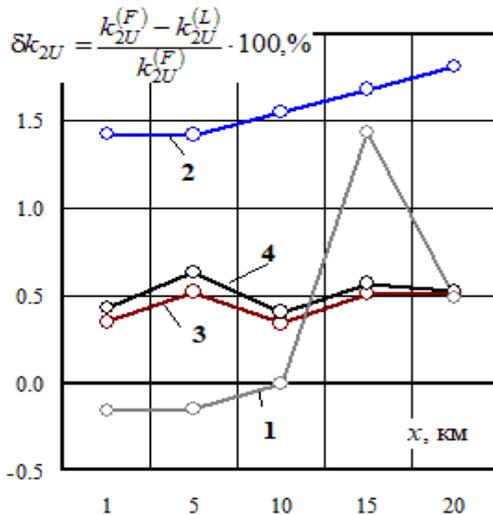
Полученные результаты показывают, что имеет место существенный рост уровней несимметрии при включении несимметричной нагрузки. Наибольший рост несимметрии по обратной последовательности наблюдается при двухфазной нагрузке для ЛЭП ДПР, а по нулевой последовательности – при однофазной нагрузке для ЛЭП, подключенной через ТСН.

Результаты расчетов при нагрузках СЦБ, подключенных на линейные напряжения, приведены на рис. 20 и 21. Из их анализа следует вывод, что при подключении нагрузок стационарных объектов на линейные напряжения исчезает несимметрия по нулевой последовательности и незначительно снижается несимметрия по обратной последовательности. Следовательно, путем переключения нагрузок 0,4 кВ на линейные напряжения можно полностью устранить несимметрию по нулевой последовательности и снизить коэффициент  $k_{2U}$  (рис. 22).

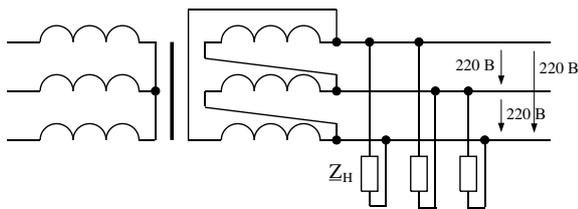


**Рис. 20.** Зависимости коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности от расстояния до питающей подстанции для линии электропередачи, подключенной через трансформатор собственных нужд

**Fig. 20.** Dependence of voltage unbalance factors by reverse sequence on the distance to the feeding substation for the power line connected through the house transformer



**Рис. 21.** Зависимости параметров  $\delta k_{2U}$  от длины линии электропередачи  
**Fig. 21.** Dependence of parameters  $\delta k_{2U}$  on the length of a power line



**Рис. 22.** Переключение нагрузок на линейные напряжения  
**Fig. 22.** Shifting the loads to the linear voltages

## Заключение

Результаты проведенных компьютерных исследований позволяют сформулировать следующие выводы:

1. При симметричных нагрузках на шинах 0,4 кВ подстанций стационарных объектов имеет место небольшая несимметрия по нулевой последовательности, возникающая из-за особенностей распределения магнитного поля рассеяния разных стержней трансформатора. Наибольшей несимметрией по нулевой последовательности характеризуется схема с ЛЭП 10 кВ, подключенной через ТСН, что связано с тройной трансформацией 27,5/0,4 кВ, 0,4/10(6) кВ и 10(6)/0,4 кВ.

2. Несимметрия напряжений по обратной последовательности на стороне 0,4 кВ зависит от длины ЛЭП. Наиболее интенсивный рост коэффициента  $k_{2U}$  имеет место в ЛЭП ПЭ и ДПР. В

наименьшей степени этот параметр зависит от величины  $x$  для ЛЭП, подключенной через ТСН. Это связано тем, что сопротивление данной сети определяется в основном сопротивлениями трансформаторов.

3. Однофазные замыкания на землю, возникающие в линиях 10(6) кВ с изолированной нейтралью, незначительно влияют на несимметрию по обратной и нулевой последовательностям напряжений на шинах 0,4 кВ подстанций.

4. Транспозиция проводов ЛЭП 6(10) кВ практически не влияет на коэффициент несимметрии по обратной последовательности напряжений 0,4 кВ.

5. Нагрузки ТСН заметно изменяют коэффициенты несимметрии по нулевой последовательности на шинах 0,4 кВ подстанций, которые получают питание через ТСН. Величины симметричных нагрузок подстанций стационарных объектов заметно влияют на уровни несимметрии по обратной и нулевой последовательностям.

6. При увеличении тяговой нагрузки наблюдается значительный рост коэффициента несимметрии по обратной последовательности на шинах 0,4 кВ подстанций. Повышение коэффициента  $k_{0U}$  значительно меньше.

7. Несимметричная нагрузка на шинах 0,4 кВ подстанций приводит к увеличению несимметрии напряжений на шинах 0,4 кВ. Наибольший рост коэффициента  $k_{2U}$  наблюдается при двухфазной нагрузке для ЛЭП ДПР, а по нулевой последовательности – при однофазной нагрузке для ЛЭП, подключенной через ТСН.

8. Переключение нагрузок СЦБ на линейные напряжения позволяет полностью устранить несимметрию по нулевой последовательности и уменьшить коэффициент  $k_{2U}$ .

9. Разработанные цифровые модели могут использоваться на практике при разработке мероприятий по улучшению качества электроэнергии в системах электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта. Цифровые модели СЭС, реализованные в фазных координатах, могут эффективно применяться при разработке киберфизических систем электроснабжения стационарных объектов [38].

## Список литературы

1. Авилов В.Д. Повышение качества электроэнергии в распределительных сетях нетяговых потребителей // Изв. Транссиба. 2013. № 1 (13). С. 48–54.
2. Авилов В.Д., Третьяков Е.А., Краузе А.В. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта // Омский научный вестник. 2013. № 1 (117). С. 183–187.
3. Бобун А.А., Пинчуков П.С. Мониторинг качества электрической энергии в линиях автоблокировки железных дорог // Актуальные вопросы и перспективы развития науки и образования. Нефтекамск, 2018. С. 23–26.
4. Карабанов М.А. Снижение влияния системы тягового электроснабжения на электропитание нетяговых потребителей в моменты подключения преобразовательных агрегатов // Известия Транссиба. 2011. № 3 (7). С. 58–67.
5. Каштанов А.Л., Ананьева Н.Г. Электрические распределительные сети железнодорожных узлов: проблемы и пути их решения // Известия Транссиба. 2018. № 1 (33). С. 79–87.
6. Ожиганов Н.В., Попов А.А., Ожиганов С.Н. О повышении качества и надежности электроснабжения средств ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 10. С. 27–30.
7. Ожиганов Н.В. Повышение качества электроэнергии для ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 1. С. 22–26.
8. Орешков Е.В. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта // Качество в производственных и социально-экономических системах. Курск, 2018. С. 106–109.
9. Соколов С.Е., Соколова И.С. Регулирование напряжения в системах электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта // Вестн. Казах. акад. транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2014. № 6 (91). С. 154–157.
10. Shinzo Tamai. Novel power electronics application in traction power supply system in Japan. 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition. 2014 Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980579.
11. Improving the Quality of Electrical Energy in the Railway Power Supply System / Ye. Sokol, V. Zamaruev, V. Ivakhno et. al. // 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2018 Publisher: IEEE. DOI:10.1109/ELNANO.2018.8477533.
12. Kneschke T. Voltage flicker calculations for single-phase AC railroad electrification systems. Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint Railroad Conference. 2003 Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/RRCON.2003.1204662.
13. Optimal Design for Power Quality of Electric Railway / H. Lee, G. Kim, S. Oh et al. // SICE-ICASE International Joint Conference. 2006 Publisher: IEEE. DOI:10.1109/SICE.2006.314842.
14. Анализ результатов моделирования системы электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта / И.С. Евдасев, А.В. Дробов, В.Н. Галушко и др. // Проблемы безопасности на транспорте. – Гомель, 2017. С. 219–221.
15. Дробов А.В. Статистическая проверка адекватности математической модели системы электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии. Кемерово, 2017. С. 65–67.
16. Евдасев И.С., Галушко В.Н., Дробов А.В. Моделирование системы электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта // Вестн. Белорус. гос. ун-та трансп. Сер.: наука и транспорт. 2017. № 2 (35). С. 33–36.
17. Третьяков Е.А., Малышева Н.Н. Моделирование установившихся режимов системы электроснабжения нетяговых потребителей // Совершенствование электромеханических преобразователей энергии. Омск, 2010. С. 54–61.
18. Zaytseva L.A., Zaytsev V.V. Methods and Tools for Predicting Working Modes of Railroad Power-Supply Systems // IET International Conference On Railway Condition Monitoring. 2006 Publisher: IET.
19. Funabiki S., Nakano H., Tanaka T. A fuzzy-based control strategy for leveling electric power fluctuations in railroad substations. 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001. Indonesia. Pro.
20. Hill R.J., Cevik I.H. On-line simulation of voltage regulation in autotransformer-fed AC electric railroad traction networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1993. Vol.: 42. Iss. 3. Publisher: IEEE.
21. Черемисин В.Т., Комяков А.А. Моделирование процессов электропотребления в системе нетягового электроснабжения железнодорожного транспорта. Омск, 2017. 161 с.
22. Аржанников Б.А., Сергеев Б.С., Набойченко И.О. Системы электроснабжения устройств СЦБ. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2009. 101 с.
23. Герман Л.А., Векслер М.И., Шелом И.А. Устройства и линии электроснабжения автоблокировки. М. : Транспорт, 1987. 192 с.
24. Герман Л.А., Калинин А.Л. Электроснабжение автоблокировки и электрической централизации. М.: Транспорт, 1974. 168 с.
25. Валяхметова В.К., Николаев В.Л., Власова В.А. Повышение надежности электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Современные инновации в науке, образовании и технике. 2018. С. 27–29.
26. Дорошук Д.В., Евдасев И.С. О параметрической надежности систем нетягового электроснабжения железнодорожного транспорта // Проблемы безопасности на транспорте. Гомель, 2005. С. 185–187.
27. Дынькин Б.Е., Лохманов В.В. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог с использованием альтернативных источников энергии // Транспорт: наука, образование, производство. Ростов на Дону, 2017. С. 92–96.
28. Use of Renewable Energy Sources to Power Railroad Traffic Safety Installations / E. Spunei, B. Protea, I. Piroi et ai // 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2019 Publisher: IEEE.
29. Косарев А.Б., Сербиненко Д.В. Система обеспечения электромагнитной совместимости устройств автоблокировки и связи с тяговым электроснабжением переменного тока // Вестн. Науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2011. № 6. С. 17–22.
30. Косарев А.Б., Сербиненко Д.В., Юрков А.Ю. Электрическое влияние системы тягового электроснабжения с высоковольтным питающим проводом на воздушные линии электропередач // Транспорт: наука, техника, управление. 2013. № 9. С. 21–24.

31. Головнёв Г.Е. Повышение энергетической эффективности работы системы электроснабжения нетяговых потребителей // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте. Омск, 2016. С. 80–84.
32. Куликова Е.А., Бебрис А.Н. Инновационное оборудование для повышения энергоэффективности систем электроснабжения нетяговых потребителей // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Нефтекамск, 2017. С. 18–23.
33. Митрофанов А.Н., Гаранин М.А., Добрынин Е.В. Управление технологиями электропотребления и энергосбережения. Самара : Изд-во СамГУПС, 2009. 150 с.
34. Никифоров М.М., Норкин И.Ю. Повышение технико-экономических показателей системы нетягового электроснабжения при внедрении АСКУЭ розничных рынков электроэнергии // Транспорт Урала. 2009. № 2 (21). С. 97–99.
35. Еркебаев А.Ж. Анализ методов оценки эффективности использования электроэнергии на нетяговые нужды железнодорожного транспорта // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта. Омск, 2018. С. 59–66.
36. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2005. 273 с.
37. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог / В.П. Закарюкин и др. ; под ред. А.В. Крюкова. М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2020. 183 с.
38. Воропай Н.И. От плана ГОЭЛРО к глобальному электроэнергетическому интернету // Электричество. 2020. № 12. С. 10–13.

### References

1. Avilov V.D. Povysheniye kachestva elektroenergii v raspreditel'nykh setyakh netyagovykh potrebiteley [Improving the quality of electricity in distribution networks of non-traction consumers]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2013, No. 1 (13), pp. 48–54.
2. Avilov V.D., Tretyakov E.A., Krause A.V. Upravleniye kachestvom elektroenergii v raspreditel'nykh setyakh zheleznodorozhnogo transporta [Power quality management in distribution networks of railway transport]. *Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk Scientific Bulletin]*, 2013, No. 1 (117), pp. 183–187.
3. Bobun A.A., Pinchukov P.S. Monitoring kachestva elektricheskoy energii v liniyakh avtoblokirovki zheleznykh dorog [Monitoring of the quality of electrical energy in auto-blocking lines of railways]. *Aktual'nyye voprosy i perspektivy razvitiya nauki i obrazovaniya [Actual problems and prospects for the development of science and education]*, 2018, pp. 23–26.
4. Karabanov M.A. Snizheniye vliyaniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na elektropitaniye netyagovykh potrebiteley v momenty podklyucheniya preobrazovatel'nykh agregatov [Reducing the influence of the traction power supply system on the power supply of non-traction consumers at the moments of connecting the converting units]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2011, No. 3 (7), pp. 58–67.
5. Kashtanov A.L., Ananyeva N.G. Elektricheskiye raspreditel'nyye seti zheleznodorozhnykh uzlov: problemy i puti ikh resheniya [Electric distribution networks of railway junctions. problems and ways of their solution]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2018, No. 1 (33), pp. 79–87.
6. Ozhiganov N.V., Popov A.A., Ozhiganov S.N. O povyshenii kachestva i nadezhnosti elektrosnabzheniya sredstv ZHAT [On improving the quality and reliability of power supply for railway automation and telemechanics]. *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, informatics]*, 2017, No. 10, pp. 27–30.
7. Ozhiganov N.V. Povysheniye kachestva elektroenergii dlya ZHAT [Improving the quality of electricity for railway automation and telemechanics]. *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, informatics]*, 2012, No. 1, pp. 22–26.
8. Oreshkov E.V. Upravleniye kachestvom elektroenergii v raspreditel'nykh setyakh zheleznodorozhnogo transporta [Power quality management in distribution networks of railway transport]. *Kachestvo v proizvodstvennykh i sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh [Quality in industrial and socio-economic systems]*. Kursk, 2018. pp. 106–109.
9. Sokolov S.E., Sokolova I.S. Regulirovaniye napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley zheleznodorozhnogo transporta [Voltage regulation in power supply systems of non-traction consumers of railway transport]. *Vestn. Kazakh. akad. transporta i kommunikatsiy im. M. Tynyshpayeva [Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications]*, 2014, No. 6 (91), pp. 154–157.
10. Shinzo Tamai. Novel power electronics application in traction power supply system in Japan. 2014 *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*. 2014 Publisher: IEEE.
11. Sokol Ye., Zamaruev V., Ivakhno V., Styslo B. Improving the Quality of Electrical Energy in the Railway Power Supply System. 2018 *IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2018 Publisher: IEEE.
12. Kneschke T. Voltage flicker calculations for single-phase AC railroad electrification systems. *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint Railroad Conference*. 2003 Publisher: IEEE.
13. Lee H., Kim G., Oh S., Lee Ch. Optimal Design for Power Quality of Electric Railway. 2006 *SICE-ICASE International Joint Conference*. 2006 Publisher: IEEE.
14. Evdasev I.S., Drobov A.V., Galushko V.N. et al. Analiz rezul'tatov modelirovaniya sistemy elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley zheleznodorozhnogo transporta [Analysis of the results of modeling the power supply system for non-traction consumers of railway transport]. *Problemy bezopasnosti na transporte [Problems of safety in transport]*. Gomel, 2017, pp. 219–221.
15. Drobov A.V. Statisticheskaya proverka adekvatnosti matematicheskoy modeli sistemy elektrosnabzheniya netyagovykh zheleznodorozhnykh potrebiteley [Statistical verification of the adequacy of the mathematical model of the power supply system

for non-traction railway consumers]. *Informatsionno-telekommunikatsionnyye sistemy i tekhnologii [Information and telecommunication systems and technologies]*. Kemerovo, 2017, pp. 65–67.

16. Evdasev I.S., Galushko V.N., Drobov A.V. Modelirovaniye sistemy elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley zheleznodorozhnogo transporta [Modeling of the power supply system for non-traction consumers of railway transport]. *Vestn. Belorus. gos. un-ta transp. Ser.: nauka i transport [Bulletin of the Belarussian State University of Transport: Science and Transport]*, 2017, No. 2 (35), pp. 33–36.

17. Tretyakov E.A., Malysheva N.N. Modelirovaniye ustanovivshikhsya rezhimov sistemy elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley [Modeling of steady-state modes of the power supply system for non-traction consumers]. *Sovershenstvovaniye elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii [Improvement of electromechanical energy converters]*. Omsk, 2010, pp. 54–61.

18. Zaytseva L.A., Zaytsev V.V. Methods and Tools for Predicting Working Modes of Railroad Power-Supply Systems. 2006 IET International Conference On Railway Condition Monitoring. 2006 Publisher: IET.

19. Funabiki S., Nakano H., Tanaka T. A fuzzy-based control strategy for leveling electric power fluctuations in railroad substations. *4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001*. Indonesia. Pro.

20. Hill R.J., Cevik I.H. On-line simulation of voltage regulation in autotransformer-fed AC electric railroad traction networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1993. Vol.: 42. Iss. 3. Publisher: IEEE.

21. Cheremisin V.T., Komyakov A.A. Modelirovaniye protsessov elektropotrebleniya v sisteme netyagovogo elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Modeling the processes of power consumption in the non-traction power supply system of railway transport]. Omsk, 2017. 161 p.

22. Arzhannikov B.A., Sergeev B.S., Naboychenko I.O. Sistemy elektrosnabzheniya ustroystv STSB [Power supply systems for signaling devices]. Yekaterinburg: UrGUPS Publ., 2009. 101 p.

23. Herman L.A., Veksler M.I., Shelom I.A. Ustroystva i linii elektrosnabzheniya avtoblokirovki [Devices and power supply lines for automatic blocking]. Moscow: Transport Publ., 1987. 192 p.

24. German L.A., Kalinin A.L. Elektrosnabzheniye avtoblokirovki i elektricheskoy tsentralizatsii [Power supply of automatic blocking and electrical centralization]. Moscow: Transport Publ., 1974. 168 p.

25. Valiyakhmetova V.K., Nikolaev V.L., Vlasova V.A. Povysheniye nadezhnosti elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley zheleznovykh dorog [Improving the reliability of power supply to non-traction consumers of railways]. *Sovremennyye innovatsii v nauke, obrazovanii i tekhnike [Modern innovations in science, education and technology]*, 2018, pp. 27–29.

26. Doroshchuk D.V., Evdasev I.S. O parametricheskoy nadezhnosti sistem netyagovogo elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [On the parametric reliability of non-traction power supply systems for railway transport]. *Problemy bezopasnosti na transporte [Problems of safety in transport]*. Gomel, 2005, pp. 185–187.

27. Dyn'kin B.E., Lokhmanov V.V. Elektrosnabzheniye netyagovykh potrebiteley zheleznovykh dorog s ispol'zovaniyem al'ternativnykh istochnikov energii [Power supply of non-traction consumers of railways using alternative energy sources]. *Transport: nauka, obrazovaniye, proizvodstvo [Transport: science, education, production]*, 2017, pp. 92–96.

28. Spunei E., Protea B., Piroi I., Navrapescu V., Piroi F. Use of Renewable Energy Sources to Power Railroad Traffic Safety Installations. 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2019 Publisher: IEEE.

29. Kosarev A.B., Serbinenko D.V. Sistema obespecheniya elektromagnitnoy sovместimosti ustroystv avtoblokirovki i svyazi s tyagovym elektrosnabzheniyem peremennogo toka [System for ensuring electromagnetic compatibility of self-locking devices and communication with AC traction power supply]. *Vestn. Nauch.-issled. in-ta zh.-d. transp. [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport]*, 2011, No. 6, pp. 17–22.

30. Kosarev A.B., Serbinenko D.V., Yurkov A.Yu. Elektricheskoye vliyaniye sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s vysokovol'tnym pitayushchim provodom na vozdushnyye linii elektropperedach [Electrical influence of a traction power supply system with a high-voltage supply wire on overhead power lines]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye [Transport: science, technology, management]*, 2013, No. 9, pp. 21–24.

31. Golovnev G.E. Povysheniye energeticheskoy effektivnosti raboty sistemy elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley [Increasing the energy efficiency of the power supply system for non-traction consumers]. *Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte [Innovative projects and technologies in education, industry and transport]*. Omsk, 2016, pp. 80–84.

32. Kulikova E.A., Bebris A.N. Innovatsionnoye oborudovaniye dlya povysheniya energoeffektivnosti sistem elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley [Innovative equipment for improving the energy efficiency of power supply systems for non-traction consumers]. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya: aktual'nyye voprosy, dostizheniya i innovatsii [Modern scientific research: topical issues, achievements and innovations]*, 2017, pp. 18–23.

33. Mitrofanov A.N., Garanin M.A., Dobrynin E.V. Upravleniye tekhnologiyami elektropotrebleniya i energosberezheniya [Management of technologies of power consumption and energy saving]. Samara, 2009, 150 p.

34. Nikiforov M.M., Norkin I.Yu. Povysheniye tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley sistemy netyagovogo elektrosnabzheniya pri vnedrenii ASKUE roznichnykh rynkov elektroenergii [Improving the technical and economic indicators of the non-traction power supply system with the introduction of an automated system for monitoring and metering electricity in retail energy markets]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2009, No. 2 (21), pp. 97–99.

35. Erkebaev A.Zh. Analiz metodov otsenki effektivnosti ispol'zovaniya elektroenergii na netyagovykh nuzhdy zheleznodorozhnogo transporta [Analysis of methods for assessing the efficiency of electricity use for non-traction needs of railway transport]. *Razrabotka i ekspluatatsiya elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem energetiki i nazemnogo transporta [Development and operation of electrical complexes and systems of energy and land transport]*. Omsk, 2018, pp. 59–66.

36. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhno Nesimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh sistem [Complexly asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk, 2005, 273 p.

37. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Lyubchenko I.A., Cherepanov A.V. Uluchsheniye kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley zheleznykh dorog [Improving the quality of electricity in power supply systems for non-traction consumers of railways]. Moscow; Berlin: Direct-Media, 2020. 183 p.

38. Voropai N.I. Ot plana GOELRO k global'nomu elektroenergeticheskomu internetu [From the Russian state electrification plan to the global electric power Internet]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2020, No. 12, pp. 10–13.

#### **Информация об авторах**

*Крюков Андрей Васильевич* – д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения; Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: and\_kryukov@mail.ru.

*Любченко Ирина Алексеевна* – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: lubchenco.i@yandex.ru.

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

*Andrei V. Kryukov* – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University; Irkutsk National Research Technical University, e-mail: and\_kryukov@mail.ru.

*Irina A. Lyubchenko* – postgraduate student, Irkutsk State Transport University, e-mail: lubchenco.i@yandex.ru.

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ  
И ОБРАБОТКА**

**INFORMATION TECHNOLOGY, MANAGEMENT  
AND PROCESSING**

## Особенности применения программного обеспечения Microsoft Project при расчете календарного плана строительства

Т. А. Дубровская✉, И. Н. Кравченя, А. И. Стрижак

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

✉ rt-555@yandex.ru

### Резюме

На сегодняшний день Белорусская железная дорога – лидер национальной системы перевозок. Являясь одним из важнейших транспортных комплексов государства, она благополучно развивается и обеспечивает около 70 % грузооборота всех видов транспорта общего пользования. Имеющаяся маршрутная линия позволяет осуществлять перевозки пассажиров в международном, межрегиональном и региональном сообщениях, а также между г. Минском и городами-спутниками. В настоящее время железнодорожное сообщение включает в себя более 2 100 населенных пунктов республики. Минск является важным транспортным узлом, через который курсируют различные категории и виды поездов. Наличие в таком важном узле железнодорожных переездов значительно усложняет его работу. Поэтому желательно все переезды реконструировать в путепроводы и развязки. В работе рассмотрено проектирование развязки городского кольца со станционными путями «Минск-Пассажирский». Произведены вычисления продолжительности строительства при двухсменном, а также трехсменном варианте строительства. Главные проектные решения предусматриваются исходя из оптимальных расходов на строительство, а также последующей результативности и безопасной эксплуатации объектов железнодорожного транспорта. Использование программы Microsoft Project при разработке календарного плана строительного-монтажных работ дает возможность улучшить процедуру организации выполнения работ на объектах железнодорожного строительства. Разработана методика взаимосвязанного применения сетевых моделей и программы Microsoft Project. Результатом исследования является создание оптимизированных вариантов организации строительства железнодорожного путепровода. При расчете продолжительности строительства применяется программа Microsoft Excel. С учетом сведений о трудозатратах, стоимости одного человеко-часа и количества работников проводится вычисление не только продолжительности строительства, но и фонда заработной платы. Представлен базовый и один конкурирующий варианты строительства. Конкурирующий вариант основан на производстве работ на трехсменном графике. Трехсменный график строительства даст возможность уменьшить продолжительность строительства объекта.

### Ключевые слова

железная дорога, календарный план, программа Microsoft Project, сетевая модель

### Для цитирования

Дубровская Т. А. Особенности применения программного обеспечения Microsoft Project при расчете календарного плана строительства / Т. А. Дубровская, И. Н. Кравченя, А. И. Стрижак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 212–224. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).212-224

### Информация о статье

поступила в редакцию: 22.09.2021, поступила после рецензирования: 19.10.2021, принята к публикации: 03.11.2021

## Features of using Microsoft Project software when calculating the construction schedule

T. A. Dubrovskaya✉, I. N. Kravchenya, A. I. Strizhak

Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

✉ rt-555@yandex.ru

### Abstract

Today the Belarusian Railway is the leader of the national transportation system. Being one of the most important transport complexes of the state, it is developing successfully and provides about 70% of the turnover of all types of public transport. The existing route line provides transportation of passengers in international, interregional and regional communications, as well as between Minsk and satellite towns. At present, the railway communication includes more than 2100 settlements of the republic. Minsk is an important transport node with different types of trains passing through. The presence of railway crossings significantly complicates its operation making it urgent to convert them into overpasses and interchanges. The work considers the design of the interchange of the city ring with the station tracks “Minsk-Passenger”. Calculations were made of the duration of construction for a two-shift, as well as a three-shift construction modes. The main design solutions are provided on the basis of optimal construction costs, as well as the ability of the subsequent effectiveness and safe operation of railway transport facilities. The use of the Microsoft Project program in the development of a construction and installation work schedule makes it possible to improve the procedure for organizing work at railway construction sites. A methodology for interconnection and application of network

models and Microsoft Project software has been developed. The result of the study is the creation of optimized options for organizing the construction of a railway overpass. When calculating the duration of construction, the Microsoft Excel program is used. Based on information about labor costs, the cost of 1 man-hour, as well as the number of employees, the calculation of the wage fund and the duration of construction is carried out. Basic and one competing construction options are presented. The competing option is based on the production of work on a three-shift schedule instead of a two-shift one. The three-shift construction schedule will make it possible to reduce the duration of the facility construction.

### Keywords

railway, organization of construction and installation works, Microsoft Project program, network model

### For citation

Dubrovskaya T. A., Kravchenya I. N., Stryzhak A. I. Osobennosti ispol'zovaniya programmnoy obespecheniya Microsoft Project pri raschete grafika stroitel'stva [Features of using Microsoft Project software when calculating the construction schedule]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 212–224. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).212-224

### Article info

Received: 22.09.2021, Revised: 19.10.2021, Accepted: 03.11.2021

### Введение

Железные дороги считаются значимым элементом общей транспортной системы страны, развитию которой придается большое значение. Главными вопросами транспорта являются своевременное качественное и полное удовлетворение народного хозяйства в перевозках, повышение эффективности его работы. Необходимо согласованное формирование транспортной концепции государства, усовершенствование работы всех видов транспорта [1].

Из числа других разновидностей транспорта железнодорожный занимает ведущее место. Это объясняется его уникальностью, перспективой обслуживать производящие отрасли хозяйства, а также исполнять потребности населения в перевозках вне зависимости от погоды, практически во всех климатических условиях и в любое время года. Непосредственно по этой причине железнодорожный транспорт остается главным средством перемещения грузов и перевозок людей. Ускорение доставки грузов и пассажиров, экологичность, способность подстраиваться под современные потребности как перевозчиков, так и получателей грузов – одна из важнейших способностей железнодорожного транспорта. Поэтому железные дороги и впредь будут только развиваться, и совершенствоваться.

Основные перспективные направления развития Белорусской железной дороги:

– строительство технической пассажирской станции в Минском железнодорожном узле (для обслуживания международных линий);

– строительство главных третьих путей от Минска до станций Помыслище, Смолевичи, Руденск и на участке обхода Минска (Помыс-

лице – Дегтяревка), а также вторых главных путей на южном и восточном обходах Минска (Колодищи – Колядичи – Помыслище) [2].

Белорусская железная дорога на сегодняшний день является лидером государственной системы перевозок. Представляя собой один из важнейших комплексов страны, она успешно обеспечивает около 70 % грузооборота всех видов транспорта общего пользования. Существующая маршрутная линия позволяет осуществлять перевозки пассажиров в международном, межрегиональном и региональном сообщениях, а также между Минском и городами-спутниками. В настоящее время железнодорожное сообщение охватывает более 2 100 населенных пунктов.

Главная железнодорожная станция и главный вокзал республики Беларусь – Минск-Пассажирский. Таким образом, минский транспортный узел – один из наиболее значимых транспортных центров Европы, следование поездов всех категорий осуществляется через него непрерывно, поезда курсируют в различных направлениях. Появление рядом с таким объектом переездов значительно затрудняет движение как железнодорожному транспорту, так и автомобильному. С целью усовершенствования эксплуатационных характеристик станции Минск-Пассажирский, повышения качества организации автомобильных перевозок на перекрестках и близлежащих улицах предусмотрено проектирование и строительство развязки городского кольца со станционными путями станции «Минск-Пассажирский». С целью осуществления этого проекта предусмотрено строительство нового

железнодорожного путепровода под три пути, переустройство железнодорожных путей с переукладкой участка пути III направления Минск-Пассажирский – Минск-Северный, работы по укреплению откосов земляного полотна временных путей посевом трав с подсыпкой растительного слоя земли, работы по устройству земляного полотна временных путей на период строительства путепровода с последующей его разборкой, планировка откосов существующего земляного полотна путей и др. Чем быстрее будут выполнены все работы, тем раньше произойдет разгрузка наиболее напряженного железнодорожного узла.

Строительство нового путепровода внесет вклад в развитие транспортных артерий города.

### История создания календарного планирования

Любой проект организации строительства включает в себя календарный план. Разработка календарного плана – единственный из обязательных этапов планирования перед возведением любого объекта. **Ведущей задачей** календарного планирования при разработке плана организации строительства считается:

- определение сроков строительства и ввода отдельных частей комплекса, а еще сроков выполнения отдельных ведущих работ;
- обоснование данной или же выявление на техническом уровне и ресурсно-вероятной продолжительности строительства проектируемого комплекса (объекта);
- определение необходимого числа рабочих и строительной техники;
- расчет вложений денежных средств и объемов работ в различные периоды строительства;
- расчет сроков доставки материалов и оборудования строящихся объектов.

Не подготовив календарный план можно столкнуться с затягиванием сроков строительства и увеличением капитальных вложений. Календарный план помогает установить последовательность и сроки производства работ. В план есть возможность вносить корректировку с учетом всех процессов, происходящих на объекте строительства.

Составление календарного плана (графика) есть не что иное, как сетевое планирование. Целью сетевого планирования является разработка графиков и систем, которые помогают вы-

полнять все работы в установленные сроки и с заданными финансовыми вложениями. Связь таких графиков и систем есть сетевая модель (сетевой график). Наличие такого графика гарантирует взаимосвязь и систематизацию всех работ и сроков их исполнения.

Объекты сетевого планирования формировались с незапамятных времен. Основоположником считается Л. Эйлер (1707–1882), решивший в 1736 г. знаменитую в то время задачу о кенигсбергских мостах [3].

Начало обширного применения сетевого планирования было связано с возникновением диаграмм Ганта, которые были замечены в начале XX в. Диаграмма Ганта – это практический инструмент для организации всевозможных процессов и их управления. В конце 1950-х гг. в США были разработаны методики сетевого планирования. В 1956 г. М. Уолкер из фирмы «Дюпон», изучая способности более действенного применения принадлежащей фирме вычислительной машины Univac, объединил собственные старания с Д. Келли из группы планирования капитального строительства фирмы «Ремингтон Рэнд». Они попробовали использовать электронно-вычислительную машину (ЭВМ) для составления планов-графиков крупных комплексов работ по модернизации заводов фирмы «Дюпон». В результате был создан рациональный и простой метод описания проекта с использованием ЭВМ. Первоначально он был назван методом Уолкера – Келли, а позднее получил название метода критического пути (или Critical Path Method).

Сетевое планирование возникло в России очень давно, когда начинал строиться Санкт-Петербург. Однако только 1961 г. можно считать годом расцвета сетевого планирования на нашей территории. С этого периода сетевое планирование стало применяться в науке и практически на всех строительных объектах. При формировании подводных отечественных ракетноносцев применялся специально разработанный вид автоматизированной системы программно-целевого управления. В последующие годы сетевое планирование в нашей стране получило обширное использование [4].

Современный период связан с усовершенствованием прежних способов сетевого планирования, но на более высоком уровне – с использованием современного программного обеспечения и индивидуальных компьютеров [5].

### Автоматизация календарного планирования

В настоящее время для работы с календарными планами все больший смысл приобретают специальные программы, позволяющие автоматизировать данный процесс. На сегодняшний день программы для составления календарных планов обладают широким спектром действий. Они дают возможность выполнять контроль и корректировку производства всех видов работ как в целом, так и в отдельности, а также позволяют составлять отчет и имеют функцию обмена данными между всеми сотрудниками. Формирование календарных планов с помощью специальных программ осуществляется довольно быстро, что увеличивает скорость выполнения самого проекта. В случае, если какие-то работы не имеют шанса быть выполненными в срок, можно пересмотреть ход их выполнения, перераспределить ресурсы, либо просто отодвинуть срок сдачи проекта, если это можно сделать в соответствии с данными условиями.

Несмотря на широкие возможности, эти программы довольно просты в использовании и их изучение не требует специальных навыков.

Для разработки календарного плана строительства, авторами статьи был проведен поиск рационального решения с целью своевременного ввода рассматриваемого объекта в эксплуатацию с помощью передовых компьютерных программ.

Решение задачи формирования календарного графика строительства, предусматривающего всевозможные ограничения, и расчета характеристик его экономической производительности, учитывающих возможные задержки сроков ввода отдельных объектов в эксплуатацию, принимается в программах управления проектами типа Project Expert, Primavera и др. [6]. Следует отметить ограниченность данных программ, связанную с применением расчета расписания работ, осуществляемого по методу критического пути [7]. Ранее данная программа применялась в основном в управлении проектами. Попробуем применить ее для построения календарного плана в железнодорожном строительстве, в частности, на примере расчета и введения железнодорожного путепровода.

Наиболее полно задача формирования календарного плана решается в системе Microsoft Project. На сегодняшний день Microsoft принадлежит 75 % рынка систем управления програм-

мами. На платформе Microsoft Project выполнены коллективные концепции в таких организациях, как Merrill-Lynch, Deutsche Bank, Delphi Automotive [8].

Продукт Microsoft Project входит в пакет Microsoft Office. Известный всем интерфейс упрощает работу с продуктом. Все это значительно сокращает время на подготовку персонала.

Программа Microsoft Project разработана в 2003 г. и была предназначена для управления проектами взаимосвязанных работ. Начиная с 2007 г. каждая новая версия программы выходит раз в три года. Согласно сравнению с иными подобными программами Microsoft Project является наиболее популярной и «легкой», относящейся к начальному уровню программного управления проектами с классическим офисным интерфейсом. На рынке однопользовательских и небольших решений программный продукт захватывает порядка 80 % (используют около 20 млн чел.) [9].

Программа Microsoft Project позволяет грамотно спланировать выполнение строительно-монтажных работ, эффективно организовать и использовать имеющиеся ресурсы, своевременно выявлять проблемы и решать их.

Программа Microsoft Project позволяет:

- вводить и корректировать график работ;
- планировать время;
- распределять средства;
- реализовывать контроль за исполнением задач;
- распределять запланированные затраты во времени и рассчитывать бюджет проекта;
- создавать оптимальную схему поставок материалов, финансирования работ и оборудования;
- исследовать риски и определить резервы с целью надежной реализации проекта;
- гарантировать информационную и аналитическую поддержку для взаимодействия подразделений компаний и других соучастников проекта [10].

В программе Microsoft Project, на базе расчетов в Microsoft Excel оформляется календарный график производства работ. В программе указываются наименования, даты начала и продолжительности работ, а также взаимосвязи, для упрощения расчета дат начала или окончания работ, в зависимости от сроков выполнения и требований одновременного начала

работ или одновременного завершения работ различной длительности. При связи одновременного завершения работ, дата начала работ рассчитывается автоматически [11].

Преимуществом программы Microsoft Project считается автоматический расчет сетевого графика, что разрешает в кратчайшие сроки смоделировать план строительства в соответствии с разными критериями и задачами. На сетевой модели изображаются взаимосвязи между работами. Это способствует переносу исходных данных с привязкой последовательностей и зависимостей между работами, так как в строительстве есть реальные и фиктивные работы.

В графическом исполнении календарный план в программе Microsoft Project можно представить с помощью диаграммы Ганта, которая представляет собой шкалу времени и работы в виде прямых линий. Таким образом, такой вариант исполнения позволяет оценить взаимосвязь работ, ресурсов и времени.

Диаграмма Ганта – линейная диаграмма, задачи проекта которой представлены протяженными в периоде отрезками, характеризующимися датами начала и окончания, задержками, а также другими временными параметрами [12].

Диаграмма Ганта представляет собой график, в котором процесс показан в двух видах: в виде таблицы, в которой представлен список работ и период их выполнения; а также в графическом виде, где каждая работа имеет вид линии определенной длины, следующей друг за другом.

В верхней, правой части диаграммы Ганта находится шкала времени. Длина отрезка и его размещение на шкале времени определяют время начала и окончания каждой задачи. Помимо этого, взаимное расположение отрезков задач показывает, следуют ли задачи одна за другой или происходит их параллельное выполнение.

С помощью Microsoft Project возможно увидеть влияние изменения одной задачи на оставшуюся часть проекта, а также применять программу для отслеживания плана изменений [13, 14].

Microsoft Project разрешает проводить автоматизацию расчетов характеристик комплекса работ по проектированию, реконструкции и строительству железнодорожных объектов с оптимизацией по времени, ресурсам и стоимости на всех этапах календарного планирования.

## Расчет календарного плана в Microsoft Project

Рассмотрим наглядно вариант использования Microsoft Project при автоматизации расчета календарного плана по строительству железнодорожного путепровода. Процедура строительства представлена с точностью детализации, необходимой для отображения производственных связей с учетом степени разработки, а также проектирования.

При расчете длительности строительства используется программа Microsoft Excel. Бесподобным плюсом Microsoft Excel является его комплексность. Объединение значительного списка расчетных функций с возможностями графических построений создает данный пакет универсальным для проведения исследований. Microsoft Excel является разновидностью электронных таблиц, в которых данные располагаются в ячейках по адресам на пересечении столбца и строки [15]. По данным о трудозатратах, стоимости одного человеко-часа и количества рабочих ведется расчет фонда заработной платы и продолжительности строительства.

Рассчитывается базовый и один конкурирующий варианты строительства. Конкурирующий вариант реализован на производстве работ не на двухсменном графике, а на трехсменном. Трехсменный график строительства позволит уменьшить продолжительность строительства объекта.

Расчет продолжительности строительства по базовому варианту основан на двухсменном графике, продолжительностью смены 8 ч. Расчет заработной платы при двухсменном и трехсменном графике работы приводится в табл. 1 и 2. Трудозатраты берутся из расчетов. Стоимость одного человеко-часа составляет 6,94 бел. руб. [16].

Вначале определяются объемы работ, трудоемкость, механоемкость, в последующем – продолжительность выполнения комплекса работ. В соответствии с технологическим процессом, строится укрупненная сетевая модель по строительству [17].

Нормы продолжительности строительства для данных видов работ отсутствуют в [18], продолжительность строительства определяется по трудозатратам, полученным по сметным расчетам:

$$T = T_{\text{труд.}} / (8 \cdot n \cdot 21 \cdot P); \quad (1)$$

где  $T$  – продолжительность строительства, мес.;  $T_{\text{труд.}}$  – трудозатраты, чел.-час; 8 – продолжи-

тельность рабочего дня, ч;  $n$  – количество смен; 21 – количество рабочих дней в месяце;  $P$  – количество рабочих, чел.

Продолжительность строительства при двух сменах – 19,56 мес., при трех сменах – 14,37. Трудозатраты одинаковы, возможна экономическая выгода при введении объекта в эксплуатацию раньше срока на 5,19 мес. и принятии коэффициента, учитывающего прогнозный индекс цен в строительстве, равнявшегося 1,0067 до мая, с мая – 1,0049 (табл. 3 и 4).

Характерной чертой действий планирования в проектном варианте работы считается не-

прекращающаяся коррекция и актуализация планов вплоть до периода окончания, по этой причине важно обладать представлением о сроках выполнения основных проектных операций, полной длительности проекта строительства.

Согласно расчетам календарного плана, для базового и конкурирующего вариантов в программе Microsoft Project графически представим календарный график строительства путепровода (рис. 1 и 2) в виде диаграмм Ганта. Наглядно видны сроки выполнения операций, что значительно облегчает качество восприятия всех процессов.

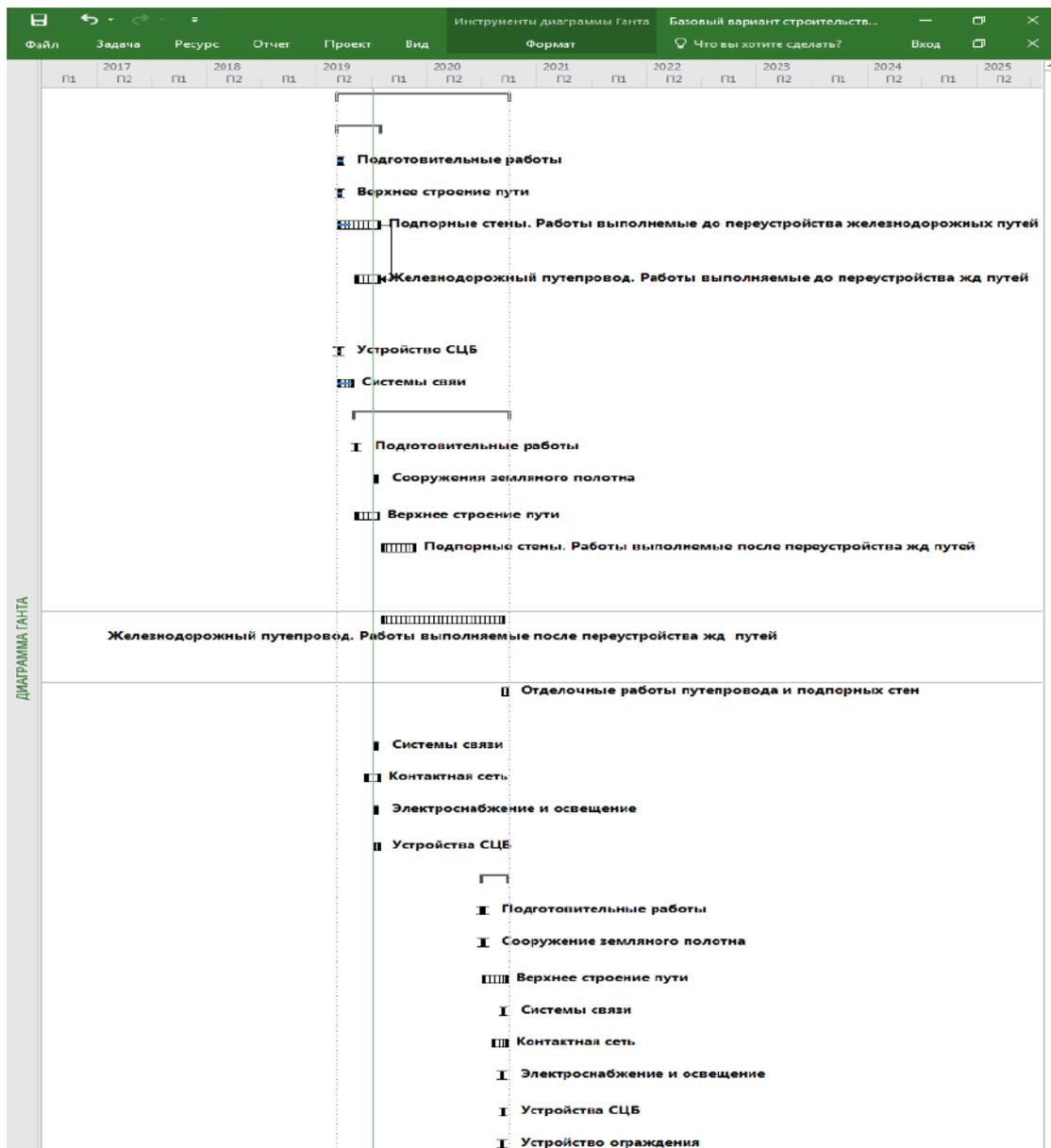
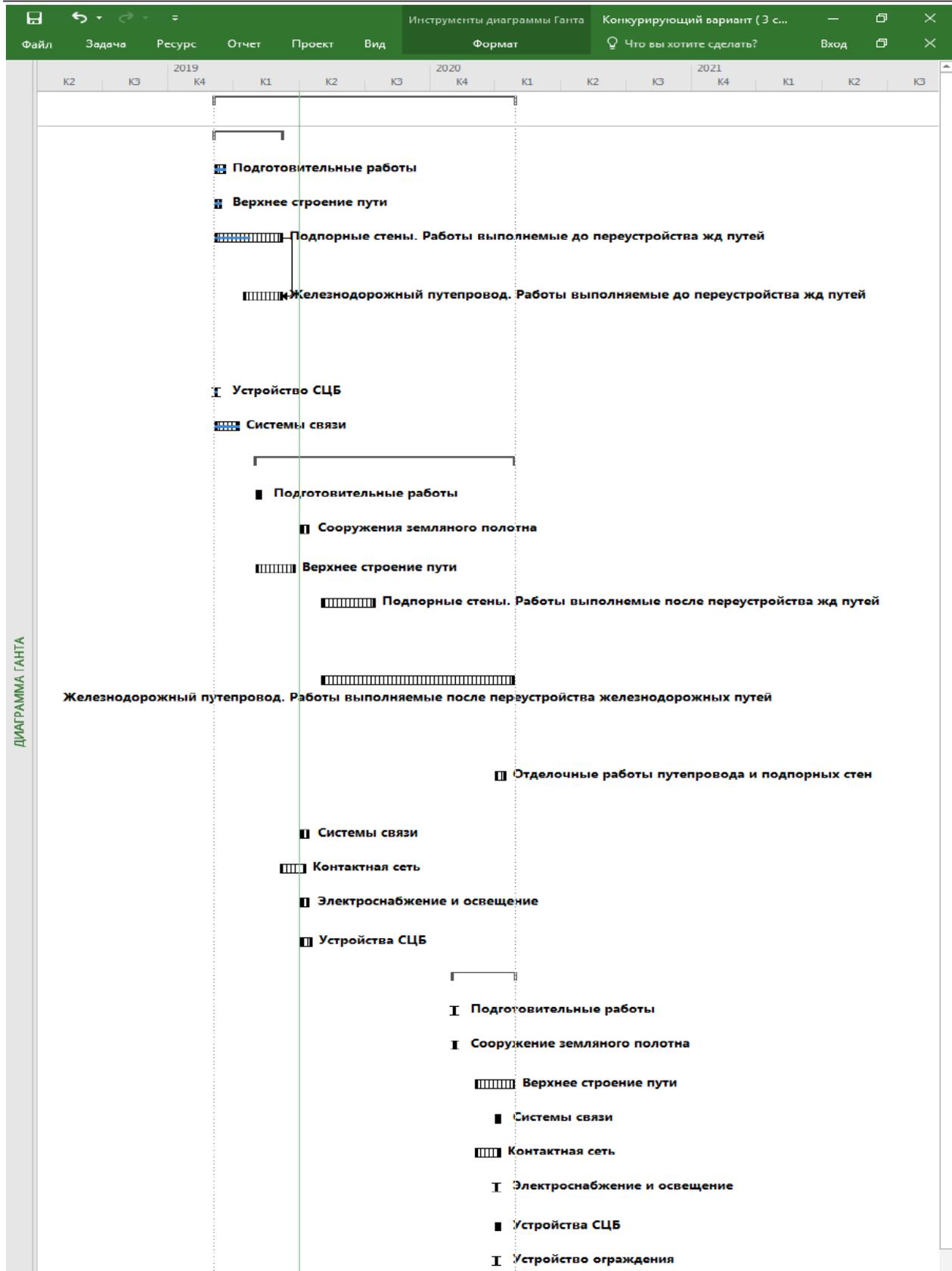


Рис. 1. Календарный график строительства, базовый вариант, графическое представление  
Fig.1. Construction schedule, basic option, graphic presentation



**Рис. 2.** Календарный график строительства, конкурирующий вариант, графическое представление  
**Fig. 2.** Construction schedule, competing option, graphic presentation

**Таблица 1.** Заработная плата при двухсменном графике на различных этапах строительства  
**Table 1.** Wages with the two-shift schedule on different construction stages

Наименование	Затраты по времени						Финансовые затраты	
	Количество трудо- затрат, чел.ч.	Количе- ство часов в смене, ч	Коли- чество смен	Количе- ство рабо- чих дней в месяце, дн	Количество человек на данную работу, чел	Продол- жительность работы, мес.	Стои- мость 1 чел.ч	Всего, руб.
I этап								
Подготовитель- ные работы	549	8	2	21,5	4	0,4	6,94	476
Верхнее строе- ние пути	1 190	8	2	21,5	11	0,3	6,94	1 032
Подпорные стены	72 425	8	2	21,5	42	5,0	6,94	62 829
Железнодорож- ный путепровод	28 085	8	2	21,5	28	2,9	6,94	24 364
Устройства СЦБ	346	8	2	21,5	5	0,2	6,94	300
Системы связи	7 732	8	2	21,5	12	1,9	6,94	6 708
Итого								95 709
II этап								
Подготовитель- ные работы	360	8	2	21,5	2	0,5	6,94	312
Сооружение зем- ляного полотна	1 960	8	2	21,5	7	0,8	6,94	1 700
Верхнее строе- ние пути	1 7917	8	2	21,5	18	2,9	6,94	15 543
Подпорные стены	53 277	8	2	21,5	39	4,0	6,94	46 218
Железнодорож- ный путепровод	66 122	8	2	21,5	14	13,7	6,94	57 361
Отделка путе- провода и под- порных стен	4 294	8	2	21,5	13	1,0	6,94	3 725
Системы связи	1 607	8	2	21,5	6	0,8	6,94	1 394
Контактная сеть	15 542	8	2	21,5	23	2,0	6,94	13 483
Электроснабже- ние и освещение	1 579	8	2	21,5	6	0,8	6,94	1 370
Устройство СЦБ	3 446	8	2	21,5	10	1,0	6,94	2 989
Итого								144 095
III этап								
Подготовитель- ные работы	212	8	2	21,5	6	0,1	6,94	184
Сооружение зем- ляного полотна	601	8	2	21,5	6	0,3	6,94	521
Верхнее строе- ние пути	22 763	8	2	21,5	22	3,0	6,94	19 747
Системы связи	1 033	8	2	21,5	6	0,5	6,94	896
Контактная сеть	18 360	8	2	21,5	27	2,0	6,94	15 927
Электроснабже- ние и освещение	467	8	2	21,5	5	0,3	6,94	405
Устройство СЦБ	1 629	8	2	21,5	10	0,5	6,94	1 413
Устройство ограждения	872	8	2	21,5	9	0,3	6,94	756
Итого								39 850

**Таблица 2.** Заработная плата при трехсменном графике на различных этапах строительства  
**Table 2.** Wages with the three-shift schedule on different construction stages

Наименование	Затраты по времени						Финансовые затраты	
	Количество трудозатрат, чел·ч	Количество часов в смене, ч	Количество смен	Количество рабочих дней в месяце, дн	Количество человек на данную работу, ч	Продолжительность работы, мес.	Стоимость 1 чел·ч	Всего, руб.
I этап								
Подготовительные работы	549	8	3	21,5	4	0,3	6,94	476
Верхнее строение пути	1 190	8	3	21,5	11	0,2	6,94	1 032
Подпорные стены	72 425	8	3	21,5	42	3,3	6,94	62 829
Железнодорожный путепровод	28 085	8	3	21,5	28	1,9	6,94	24 364
Устройства СЦБ	346	8	3	21,5	5	0,1	6,94	300
Системы связи	7 732	8	3	21,5	12	1,2	6,94	6 708
							Итого	95 709
II этап								
Подготовительные работы	360	8	3	21,5	2	0,3	6,94	312
Сооружение земляного полотна	1 960	8	3	21,5	7	0,5	6,94	1 700
Верхнее строение пути	17 917	8	3	21,5	18	1,9	6,94	15 543
Подпорные стены	53 277	8	3	21,5	39	2,6	6,94	46 218
Железнодорожный путепровод	66 122	8	3	21,5	14	9,2	6,94	57 361
Отделка путепровода и подпорных стен	4 294	8	3	21,5	13	0,6	6,94	3 725
Системы связи	1 607	8	3	21,5	6	0,5	6,94	1 394
Контактная сеть	15 542	8	3	21,5	23	1,3	6,94	13 483
Электроснабжение и освещение	1 579	8	3	21,5	6	0,5	6,94	1 370
Устройство СЦБ	3 446	8	3	21,5	10	0,7	6,94	2 989
							Итого	144 095
III этап								
Подготовительные работы	212	8	3	21,5	6	0,1	6,94	184
Сооружение земляного полотна	601	8	3	21,5	6	0,2	6,94	521
Верхнее строение пути	22 763	8	3	21,5	22	2,0	6,94	19 747
Системы связи	1 033	8	3	21,5	6	0,3	6,94	896
Контактная сеть	18 360	8	3	21,5	27	1,3	6,94	15 927
Электроснабжение и освещение	467	8	3	21,5	5	0,2	6,94	405
Устройство СЦБ	1 629	8	3	21,5	10	0,3	6,94	1 413
Устройство ограждения	872	8	3	21,5	9	0,2	6,94	756
							Итого	39 850

**Таблица 3.** Календарный план строительства, базовый вариант  
**Table 3.** Construction schedule, basic option

Название задачи	Длительность, мес.	Начало периода	Окончание периода	Название ресурсов	Затраты, бел. руб.
Строительство объекта	19,56	Пн 3.02.20	Пн 30.08.21		279 653,00
<b>I этап строительства</b>	<b>2,5</b>	<b>Пн 3.02.20</b>	<b>Пн 29.06.20</b>		<b>95 709,00</b>
Подготовительные работы	0,4	Пн 3.02.20	Вт 25.02.20	Подготовительные работы	476,00
Верхнее строение пути	0,3	Пн 3.02.20	Ср 19.02.20	Верхнее строение пути	1 032,00
Подпорные стены. Работы, выполняемые до переустройства ж/д путей	5	Пн 3.02.20	Пн 29.06.20	Подпорные стены. Работы, выполняемые до переустройства ж/д путей	62 829,00
Железнодорожный путепровод. Работы, выполняемые до переустройства ж/д путей	3	Ср 1.04.20	Пн 29.06.20	Железнодорожный путепровод. Работы, выполняемые до переустройства ж/д путей	24 364,00
Устройства СЦБ	0,2	Пн 3.02.20	Чт 13.02.20	Устройство СЦБ	300,00
Системы связи	2	Пн 3.02.20	Ср 1.04.20	Системы связи	6 708,00
<b>II этап строительства</b>	<b>17,57</b>	<b>Ср 1.04.20</b>	<b>Пн 30.08.21</b>		<b>144 095,00</b>
Подготовительные работы	0,5	Ср 1.04.20	Ср 15.04.20	Подготовительные работы	312,00
Сооружения земляного полотна	0,8	Пн 1.06.20	Вт 23.06.20	Сооружения земляного полотна	1 700,00
Верхнее строение пути	3	Ср 1.04.20	Пт 26.06.20	Верхнее строение пути	15 543,00
Подпорные стены. Работы, выполняемые после переустройства железнодорожных путей	4	Ср 1.07.20	Пн 26.10.20	Подпорные стены. Работы, выполняемые после переустройства ж/д путей	46 218,00
Железнодорожный путепровод. Работы, выполняемые после переустройства ж/д путей	14	Ср 1.07.20	Пн 16.08.21	Железнодорожный путепровод. Работы, выполняемые после переустройства железнодорожных путей	57 361,00
Отделочные работы путепровода и подпорных стен	1	Пн 2.08.21	Пн 30.08.21	Отделочные работы путепровода и подпорных стен	3 725,00
Системы связи	0,8	Пн 1.06.20	Вт 23.06.20	Системы связи	1 394,00
Контактная сеть	2	Пн 4.05.20	Вт 30.06.20	Контактная сеть	13 483,00
Электроснабжение и освещение	0,8	Пн 1.06.20	Вт 23.06.20	Электроснабжение и освещение	1 370,00
Устройства СЦБ	1	Пн 1.06.20	Пн 29.06.20	Устройства СЦБ	2 989,00
<b>III этап строительства</b>	<b>3,05</b>	<b>Вт 1.06.21</b>	<b>Пт 27.08.21</b>		<b>39 849,00</b>
Подготовительные работы	0,1	Вт 1.06.21	Чт 3.06.21	Подготовительные работы	184,00
Сооружение земляного полотна	0,3	Вт 1.06.21	Ср 9.06.21	Сооружение земляного полотна	521,00
Верхнее строение пути	3	Вт 1.06.21	Чт 26.08.21	Верхнее строение пути	19 747,00
Системы связи	0,5	Пн 2.08.21	Пн 16.08.21	Системы связи	896,00
Контактная сеть	2	Чт 1.07.21	Пт 27.08.21	Контактная сеть	15 927,00
Электроснабжение и освещение	0,3	Пн 2.08.21	Вт 10.08.21	Электроснабжение и освещение	405,00
Устройства СЦБ	0,5	Пн 2.08.21	Пн 16.08.21	Устройства СЦБ	1 413,00
Устройство ограждения	0,3	Пн 2.08.21	Вт 10.08.21	Устройство ограждения	756,00

**Таблица 4.** Календарный план строительства, конкурирующий вариант  
**Table 4.** Construction schedule, competing option

Название задачи	Длительность, мес.	Начало периода	Окончание периода	Название ресурсов
Строительство объекта	14,37	Пн 3.02.20	Пн 30.03.21	
<b>I этап строительства</b>	<b>1,66</b>	<b>Пн 3.02.20</b>	<b>Пн 8.05.20</b>	
Подготовительные работы	0,3	Пн 3.02.20	Ср 19.02.20	Подготовительные работы
Верхнее строение пути	0,2	Пн 3.02.20	Чт 13.02.20	Верхнее строение пути
Подпорные стены. Работы, выполняемые до переустройства ж/д путей	3,3	Пн 3.02.20	Пт 8.05.20	Подпорные стены. Работы, выполняемые до переустройства ж/д путей
Железнодорожный путепровод. Работы, выполняемые до переустройства ж/д путей	1,9	Пт 13.03.20	Пт 8.05.20	Железнодорожный путепровод. Работы, выполняемые до переустройства ж/д путей
Устройства СЦБ	0,1	Пн 3.02.20	Пт 7.02.20	Устройство СЦБ
Системы связи	1,2	Пн 3.02.20	Пн 9.03.20	Системы связи
<b>II этап строительства</b>	<b>12,30</b>	<b>Ср 1.04.20</b>	<b>Пн 29.03.21</b>	
Подготовительные работы	0,3	Ср 1.04.20	Чт 9.04.20	Подготовительные работы
Сооружения земляного полотна	0,5	Пн 1.06.20	Пн 15.06.20	Сооружения земляного полотна
Верхнее строение пути	1,9	Ср 1.04.20	Вт 26.05.20	Верхнее строение пути
Подпорные стены. Работы, выполняемые после переустройства ж/д путей	2,6	Ср 1.07.20	Вт 15.09.20	Подпорные стены. Работы, выполняемые после переустройства ж/д путей
Железнодорожный путепровод. Работы, выполняемые после переустройства ж/д путей	9,2	Ср 1.07.20	Пн 29.03.21	Железнодорожный путепровод. Работы, выполняемые после переустройства ж/д путей
Отделочные работы путепровода и подпорных стен	0,6	Пн 2.08.21	Ср 17.03.21	Отделочные работы путепровода и подпорных стен
Системы связи	0,5	Пн 1.06.20	Пн 15.06.20	Системы связи
Контактная сеть	1,3	Пн 4.05.20	Ср 10.06.20	Контактная сеть
Электроснабжение и освещение	0,5	Пн 1.06.20	Пн 15.06.20	Электроснабжение и освещение
Устройства СЦБ	0,7	Пн 1.06.20	Пт 19.06.20	Устройства СЦБ
<b>III этап строительства</b>	<b>3,0</b>	<b>Пт 1.01.21</b>	<b>Вт 30.03.21</b>	
Подготовительные работы	0,1	Пт 1.01.21	Вт 5.01.21	Подготовительные работы
Сооружение земляного полотна	0,2	Пт 1.01.21	Чт 7.01.21	Сооружение земляного полотна
Верхнее строение пути	2	Пн 1.02.21	Вт 30.03.21	Верхнее строение пути
Системы связи	0,3	Пн 1.03.21	Вт 9.03.21	Системы связи
Контактная сеть	1,3	Пн 1.02.21	Ср 10.03.21	Контактная сеть
Электроснабжение и освещение	0,2	Пн 1.03.21	Пт 5.03.21	Электроснабжение и освещение
Устройства СЦБ	0,3	Пн 1.03.21	Вт 9.03.21	Устройства СЦБ
Устройство ограждения	0,2	Пн 2.08.21	Пт 5.03.21	Устройство ограждения

**Выводы**

Раскрыты основные принципы работы программы Microsoft Project. Осуществлен сравнительный анализ Microsoft Project и Microsoft Excel с выявлением их особенностей и возможностей использования при организации календарного плана строительства путепровода. Microsoft Project имеет ряд преимуществ перед Microsoft Excel при составлении календарного плана.

Использование сетевых модификаций дает возможность осуществить имитационное моде-

лирование с вероятностными параметрами, изменением структуры графика, критического пути, однако, при этом не изменяются ограничения по ресурсным и фронтальным связям.

Результатом применения Microsoft Project является оптимизация процесса организации календарного плана строительства с возможным сокращением времени выполнения работ, расчетом ресурсного обеспечения на протяжении всего периода, отражением реального хода выполнения работ и оперативным управлением.

**Список литературы**

1. ТР ТС 003/2011 О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта. Введ. 15.07.2011. М.: Росстандарт, 2011. 66 с.
2. Государственная программа «Транспортный комплекс» на 2021–2025 гг. Утв. постановлением совета министров республики Беларусь 23 марта 2021 г. № 165. 66 с.
3. Теория графов: основные понятия и задачи. Графы как структура данных. URL: [https://function-x.ru/graphs1\\_relations.html](https://function-x.ru/graphs1_relations.html).
4. Рazu М.Л., Лялин А.М., Бронникова Т.М., Рazu Б.М., Титов С.А., Якутин Ю.В. Управление проектом: Основы проектного управления. М.: КНОРУС, 2007. 768 с.
5. Сетевое планирование. URL: <http://upr-proektom.ru/setevoe-planirovanie>.
6. Белецкая Л.В., Киреевко В.П., Поснов Н.Н. Информационные технологии в бизнесе. В 3 ч. Ч. 3. Project Expert. Минск: ГИУСТ БГУ, 2012. 72 с.
7. Олейникова С.А. Критический анализ метода PERT решения задачи управления проектами со случайной длительностью выполнения работ // Системы управления и информационные технологии. 2013. Т. 51. № 1. С. 20–24.
8. Преимущества Microsoft Project как инструментария создания системы управления проектами. URL: <https://scicenter.online/management-scicenter/237-preimuschestva-microsoft-project-kak-35706.html>.
9. MS Project. URL: <https://finswin.com/projects/instrumenty/microsoft-project.html>.
10. Głodziński E., Szymborski M. Utilization of Software Supporting Project Management in Middle and Large Project-Based Organizations: an Empirical Study in Poland // Procedia Computer Science, Vol. 164, 2019, P. 389–396 doi.org/10.1016/j.procs.2019.12.198.
11. Карпов В.А. Методические рекомендации по использованию пакета программ «Project Expert» в учебном процессе. Од.: ХГЭУ, 2000. 24 с.
12. Диаграмма Ганта. URL: <https://acceleration.ru/novosti/gantt-chart>.
13. Unegbu H.C.O., Yawas D.S., Dan-asabe B. An investigation of the relationship between project performance measures and project management practices of construction projects for the construction industry in Nigeria // Journal of King Saud University – Engineering Sciences, 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.10.001>.
14. Chatfield C., Johnson T. Microsoft Project 2016 Step by Step / Microsoft Press. A division of Microsoft Corporation. – Washington: Copyright, 2016. 516 p. URL: <http://cnaiman.com/PM/MIT-LabText/2016/MP.2016.Step.by.Step.pdf>.
14. Сдвижков О.А. Математика в Excel 2003. М.: Солон-Пресс, 2005. 191 с.
15. Постановление Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 24 июня 2019 г. № 39. Введ. 25.07.2019.
16. Сетевое моделирование строительных процессов. URL: <http://upr-proektom.ru/setevoe-modelirovanie-stroitelnykh-processov>.
17. ТКП 45-1.03-213-2010 (02250) Нормы продолжительности строительства объектов транспорта и транспортной инфраструктуры. Введ. 01.01.2011. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2011. 52 с.

**References**

1. O bezopasnosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta [On the safety of railway transport infrastructure]: Technical Regulations of the Customs Union TP TC 003/2011. Moscow, RosStandar Publ., 2011. 66 p.
2. Gosudarstvennaya programma «Transportnyj kompleks» na 2021–2025 gg [State program «Transport complex» for 2021–2025 years]. Approved by the Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus on March 23, 2021, No. 165. 66 p.
3. Teoriya grafov: osnovnye ponyatiya i zadachi. Grafy kak struktura dannykh [Graph theory: basic concepts and tasks. Graphs as a data structure]. URL: [https://function-x.ru/graphs1\\_relations.html](https://function-x.ru/graphs1_relations.html).
4. Razu M.L., Lyalin A.M., Bronnikova T.M., Razu B.M., Titov S.A., Yakutin Yu.V. Upravleniye proyektom: Osnovy proyektogo upravleniya [Project management: Fundamentals of project management]. Moscow: KNORUS, 2007. 768 p.
5. Setevoe planirovanie [Network planning]. URL: <http://upr-proektom.ru/setevoe-planirovanie>.
6. Beletskaya L.V., Kireenka V.P., Posnov N.N. Informatsionnye tekhnologii v biznese. V 3 ch. CH. 3. Project Expert [Information technology in business. At 3 parts. Part 3. Project Expert]. Minsk: GIUST BSU, 2012. 72 p.

7. Oleynikova S.A. Kriticheskiy analiz metoda PERT resheniya zadachi upravleniya proyektami so sluchaynoy dlitel'nost'yu vypolneniya rabot [Critical analysis of the PERT method for solving a project management problem with a random duration of work execution]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii* [Control systems and information technologies]. 2013. Vol. 2, No. 1, pp. 20–24.
8. Preimushhestva Microsoft Project kak instrumentariya sozdaniya sistemy upravleniya proektami [Advantages of Microsoft Project as a toolkit for creating a Project Management System]. URL: <https://scicenter.online/management-scicenter/237-preimushchestva-microsoft-project-kak-35706.html>.
9. MS Project [MS Project]. URL: <https://finswin.com/projects/instrumenty/microsoft-project.html>.
10. Głodziński E., Szymborski M. Utilization of Software Supporting Project Management in Middle and Large Project-Based Organizations: an Empirical Study in Poland. *Procedia Computer Science*, Vol. 164, 2019, pp. 389–396. doi.org/10.1016/j.procs.2019.12.198.
11. Karpov V.A. Metodicheskiye rekomendatsii po ispol'zovaniyu paketa programm «Project Expert» v uchebnom protsesse [Methodical recommendations for the use of the «Project Expert» software package in the educational process]. Od.: KhGEU, 2000. 24 p.
12. Diagramma Ganta [Gantt chart]. URL: <https://acceleration.ru/novosti/gantt-chart>.
13. Unegbu H.C.O., Yawas D.S., Dan-asabe B. An investigation of the relationship between project performance measures and project management practices of construction projects for the construction industry in Nigeria. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.10.001>.
14. Chatfield C., Johnson T. Microsoft Project 2016 Step by Step. *Microsoft Press. A division of Microsoft Corporation*. Washington: Copyright, 2016. 516 p. URL: <http://cnaiman.com/PM/MIT-LabText/2016/MP.2016.Step.by.Step.pdf>.
15. Sdvizhkov O. A. Matematika v Exsel 2003 [Mathematics in Excel 2003]. Moscow: Solon-Press Publ., 2005. 191 p.
16. Postanovlenie Ministerstva arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus' ot 24 iyunya 2019 g, no 39 [Resolution of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus dated June 24, 2019, no 39]. Introduction: 25.07. 2019.
17. Setevoe modelirovanie stroitel'nykh protsessov [Network modeling of construction processes]. URL: <http://upr-proektom.ru/setevoe-modelirovanie-stroitelnykh-protsessov>.
18. Normy prodolzhitel'nosti stroitel'stva ob'yektov transporta i transportnoy infrastruktury [Standards for the duration of construction of transport facilities and transport infrastructure]: TCP 45-1.03-213-2010 (02250): construction standards of Belarus. Minsk, 2011. 52 p.

#### Информация об авторах

*Дубровская Татьяна Алексеевна* – канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, e-mail: [rt-555@yandex.ru](mailto:rt-555@yandex.ru).

*Кравченя Ирина Николаевна* – канд. техн. наук, доцент кафедры управления автомобильными перевозками и дорожным движением, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, e-mail: [krav\\_2000@mail.ru](mailto:krav_2000@mail.ru).

*Стрижак Алёна Игоревна* – кафедра проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, e-mail: [aliona.roshchyna@gmail.com](mailto:aliona.roshchyna@gmail.com).

#### Information about the authors

*Tatyana A. Dubrovskaya* – Ph.D. in Engineering science, Associate Professor of the Department Design, construction and operation of transport facilities, Belarusian State University of Transport, Gomel, e-mail: [rt-555@yandex.ru](mailto:rt-555@yandex.ru).

*Irina N. Kravchenya* – Ph.D in Engineering science, Associate Professor of the Department of Automobile Transportation and Road Traffic Management, Belarusian State University of Transport, Gomel, e-mail: [krav\\_2000@mail.ru](mailto:krav_2000@mail.ru).

*Alyona I. Stryzhak* – Department Design, construction and operation of transport facilities of the Faculty of Civil Engineering, Belarusian State University of Transport, Gomel, e-mail: [aliona.roshchyna@gmail.com](mailto:aliona.roshchyna@gmail.com).

**Краковский Юрий Мечеславович**

Доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения».



Юрий Мечеславович закончил школу в г. Ангарске и поступил в Томский политехнический институт на факультет автоматики и вычислительной техники. После окончания вуза в 1969 году работал в Ангарске, где занимался разработкой и внедрением АСУ предприятий. За внедрение этих работ имеет медаль ВДНХ.

В 1976 году защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Исследование операций и системный анализ», а в 1981 году получил аттестат доцента, работая в Иркутском политехническом институте.

С 1986 года по март 1993 года работал в Иркутском научном центре СО АН в должности заведующего лаборатории по моделированию технологических систем. Участвовал в создании и внедрении АСУ ТП, САПР и интегрированных автоматизированных производств, руководил фундаментальными исследованиями по программам «Разработка интегрированной информационной технологии для решения задач

автоматизации и моделирования объектов машиностроения» и других.

В 1992 году защитил докторскую диссертацию по теме «Разработка и исследование методов анализа и расчета системных показателей и моделей синтеза для проектирования ГПС». В 1994 году получил аттестат профессора по кафедре «Математическое обеспечение САПР».

С 1993 года по 1996 год работал директором Иркутского областного центра новых информационных технологий, где занимался внедрением этих технологий в обучение и образование в вузах Иркутской области. С 2008 года работает в ИрГУПС.

Краковский Ю.М. один из участников создания Центра оперативного управления Восточно-Сибирской железной дороги; автор более 300 научных и научно-методических работ, включая публикации по развитию Восточного полигона ОАО «РЖД», например: Моделирование перевозочного процесса железнодорожным транспортом: анализ, прогнозирование, риски / Ю.М. Краковский, С.К. Каргапольцев, В.А. Начигин; под ред. проф. Ю.М. Краковского. – СПб.: ЛИТЕО, 2018. – 240 с.

Им лично подготовлены три учебных пособия по тематике кафедры, например: Методы защиты информации. – СПб.: Лань, 2021. – 236 с.

Краковским Ю.М. подготовлено более 25 кандидатов наук в области системного анализа, обработки информации и математического моделирования. В последние годы активно развивает направление: «Разработка специального программно-математического обеспечения для оценки эффективности и надежности сложных систем в условиях неопределенности и риска»

За заслуги в развитии науки, многолетний добросовестный труд, профессиональное мастерство Краковский Ю.М. награжден различными почетными грамотами от Министерства образования РФ, Губернатора Иркутской области, мэра г. Иркутска, ректора ИрГУПС и др.

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

**№ 4 ( 72 )**  
**2 0 2 1**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

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

Подписано в печать 24.12.2021. Формат 60x84/8.  
Дата выхода в свет 30.12.2021  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14.  
Уч.-изд. л. 17,27. Тираж 500 экз. Заказ № 3598  
Подписной индекс по каталогу «Урал-Пресс»: 64556  
ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ РАН.

Сведения о журнале ежегодно  
публикуются в международной справочной системе  
по периодическим и продолжающимся изданиям  
«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01

Маркировка информационной продукции - не маркируется  
Цена свободная

Адрес редакции, издательства и типографии  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.  
Иркутский государственный университет путей сообщения  
Телефон: 8(3952) 63-83-89, E-mail: stsam@irgups.ru

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

Учредитель: ФГБОУ ВО "Иркутский государственный университет путей сообщения"  
(664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)