

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

ISSN 1813-9108 (Print)

Современные технологии системный анализ Моделирование

2024
№ 4 (84)

Иркутский государственный
университет путей сообщения

Машиностроение • Транспортные системы • Информационные технологии



2024 № 4(84)

Machine Building • Transport Systems • Information Technology

Modern technologies system analysis Modeling

2024
No. 4 (84)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

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

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

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№ 4 (84)

2 0 2 4

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **Ю.А. Трофимов**
Ответственный за выпуск **Д.В. Буторин**

Приоритетные цели журнала

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

Стратегические задачи

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

Учредитель и издатель

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

Главный редактор

Ю.А. Трофимов, канд. техн. наук, доц., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

Заместители главного редактора

Е.Ю. Дульский, д-р техн. наук, доц., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

Д.В. Буторин, канд. техн. наук, доц., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

Редакционный совет

В.А. Анисимов, д-р техн. наук, доц., Петербургский государственный университет путей сообщения (г. Санкт-Петербург, РФ)

С.А. Бессоненко, д-р техн. наук, проф., Сибирский государственный университет путей сообщения (г. Новосибирск, РФ)

И.В. Бычков, д-р техн. наук, академик РАН, проф., Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения РАН (г. Иркутск, РФ)

В.Е. Гозбенко, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

А.Л. Казаков, д-р физ.-мат. наук, проф. РАН, Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения РАН (г. Иркутск, РФ)

Ю.М. Краковский, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

А.В. Крюков, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

Н.А. Махутов, д-р техн. наук, член-корреспондент РАН, проф., Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (г. Москва, РФ)

В.В. Москвичев, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, Красноярский филиал - специальное конструкторско-технологическое бюро "Наука" ФИЦ ИВЦ (г. Красноярск, РФ)

А.В. Мурыгин, д-р техн. наук, проф., Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва (г. Красноярск, РФ)

Н.С. Нестерова, д-р техн. наук, доц., Дальневосточный государственный университет путей сообщения (г. Хабаровск, РФ)

С.И. Носков, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

С.М. Овчаренко, д-р техн. наук, проф., Омский государственный университет путей сообщения (г. Омск, РФ)

В.А. Подвербный, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

Р. Энхбат, д-р физ.-мат. наук, проф., Монгольский национальный университет (г. Улан-Батор, Монголия)

Здислав Якиевич, д-р техн. наук, проф., Университет штата Аризона (США)

А.С. Янюшкин, д-р техн. наук, проф., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (г. Чебоксары, РФ)

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

Телефон: +7(3952) 63-83-74

e-mail: stsam@irgups.ru

Сайт: <http://stsam.irgups.ru> (<http://ojs.irgups.ru/index.php/stsam>)

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 группам научных специальностей: машиностроение; транспортные системы.

Modern technologies System analysis Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)

2024
No. 4 (84)
Published quarterly

Founded in 2004

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.

Strategic objectives

- 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
(15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russian Federation)

Editor-in-Chief

Yu.A. Trofimov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Prof, Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

Deputy Editor-in-Chief

E.Yu. Dul'skii, D.Sc. in Engineering, Associate Prof, Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

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

Editorial council

V.A. Anisimov, D.Sc. in Engineering, Associate Prof., Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Saint Petersburg, Russian Federation)

S.A. Bessonenko, D.Sc. in Engineering, Associate Prof., Siberian Transport University (Novosibirsk, Russian Federation)

I.V. Bychkov, D.Sc. in Engineering, Academician of RAS, Prof., Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of RAS (Irkutsk, Russian Federation)

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

A.L. Kazakov, D.Sc. in Physics and Mathematics, Prof. RAS, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of RAS (Irkutsk, Russian Federation)

Yu.M. Krakovskiy, 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)

N.A. Makhutov, D.Sc. in Engineering, Prof., corresponding member of the RAS, Prof., Mechanical Engineering Reserch Institute of the RAS (Moscow, Russian Federation)

V.V. Moskvichov, D.Sc. in Engineering, Prof., Krasnoyarsk Branch Office of the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS (Krasnoyarsk, Russian Federation)

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

N.S. Nesterova, D.Sc. in Engineering, Associate Prof., Far Eastern State Transport University (Khabarovsk, Russian Federation)

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

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

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

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

Tel.: +7(3952) 63-83-74

e-mail: stsam@irgups.ru

Web-Site: <http://stsam.irgups.ru> (<http://ojs.irgups.ru/index.php/stsam>)

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

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

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

The journal is included in the list of leading scholarly journals

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

- Mechanical engineering;
- Transport systems.

СОДЕРЖАНИЕ

Транспортные системы

Коновалов В.Р., Дульский Е.Ю., Емельянов Д.О., Буйносков А.П. Методика построения профилограмм тормозных колодок пассажирского подвижного состава с различными видами дефектов и степенью износа	10
Тимофеев Е.Н., Севостьянов А.А. Перспективы использования цифровой модели железнодорожного пути в рамках планирования и организации работ	21
Власова Н.В., Царегородцева Е.Ю. Структурные особенности отрасли транспортно-логистических услуг с выделением сегментов, потребителей, конкурентов в кластере грузовых перевозок, экспедиторских и складских услуг	32
Пузина Е.Ю. Оптимизация режимов работы системы тягового электроснабжения на участке обхода тоннеля	42
Асламова В.С., Асламов А.А., Шуткин А.А. Сопоставительный анализ показателей травматизма на автодорогах Иркутской области в 2022–2023 гг.	54
Архит Буяннэмэх, Оленцевич В.А. Перспективы развития инфраструктурного комплекса Монголии с учетом прироста грузопотока	67

Информационные технологии

- Кашковский В.В., Краковский Ю.М., Начигин В.А., Назаров П.С.** Применение цифрового двойника предприятия для оценки производственных показателей транспортной организации 80
- Капшунов В.В., Носальская Т.Э.** Оценка точности графического метода кинематического анализа с использованием анимационного моделирования в САД-системе «Компас» 91
- Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Хоменко А.П., Налётов В.А.** Вибродиагностика насосного оборудования тепловых электростанций 103

CONTENTS

Transport Systems

Konovalov V.R., Dul'skii E.Yu., Emel'yanov D.O., Buinosov A.P. Methodology for constructing profilograms of brake pads of passenger rolling stock with various types of defects and degree of wear	10
Timofeev E.N., Sevost'yanov A.A. Prospects for the use of a digital railway track model within the framework of planning and organization of works	21
Vlasova N.V., Tsaregorodtseva E.Yu. Structural features of the transport and logistics services industry With identification of segments, consumers, competitors in the freight transportation cluster, forwarding and warehousing services	32
Puzina E.Yu. Optimization of operation modes of the traction power supply system at the tunnel bypass site	42
Aslamova V.S., Aslamov A.A., Shutkin A.A. Comparative analysis of injury rates on the roads of the Irkutsk region in 2022–2023	54
Arkhit Buyannemekh, Olentsevich V.A. Prospects for the development of Mongolia's infrastructure complex, taking into account the increase in cargo traffic	67

Information Technology

- Kashkovskii V.V., Krakovskii Yu.M., Nachigin V.A., Nazarov P.S.** Using a digital twin of an enterprise to assess the production performance of a transport organization 80
- Kapshunov V.V., Nosal'skaya T.E.** Evaluation of the accuracy of the graphical method of kinematic analysis using animation modeling in the CAD system Kompas 91
- Luk'yanovm, Aleinikov D.P., Khomenko A.P., Naletov V.A.** Vibration diagnostics of pumping equipment of thermal power plants 103

Требования к статьям, принимаемым к публикации

Рукописи статей представляются в электронном и распечатанном виде.

Рекомендуемый объем статей 9-12 стр.

1. К статье прилагается:

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

2. Статья включает в себя:

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

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

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

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

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

При вставке формул использовать только Microsoft Equation 3 с параметрами:

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

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

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

Статьи, представляемые в журнал, проходят обязательное рецензирование.

Самоцитирование журнала в статьях **запрещено**.

Пример оформления статьи представлен на сайте журнала: <http://stsam.ircups.ru> (<http://ojs.ircups.ru/index.php/stsam>)

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

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

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

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

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

TRANSPORT SYSTEMS

Методика построения профилограмм тормозных колодок пассажирского подвижного состава с различными видами дефектов и степенью износа

В.Р. Коновалов¹✉, Е.Ю. Дульский¹, Д.О. Емельянов¹, А.П. Буйносов²

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

²Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉konovalovvlad190@gmail.com

Резюме

В статье рассматривается методика построения профилограмм тормозных колодок пассажирского подвижного состава с различными видами дефектов и степенью износа, которая в будущем может сыграть важную роль в снижении износа тормозной колодки пассажирского подвижного состава, что будет способствовать повышению безопасности транспортных средств и принесет определенный экономический эффект. С помощью 3D-сканера RangeVision Spectrum отсканированы тормозные колодки пассажирского подвижного состава с различными видами дефектов и степенью износа. На заключительном этапе в системе автоматизированного проектирования «Компас-3D» были построены профилограммы в виде двухмерных изображений, что позволило определить точную форму и размеры колодки в данном сечении. Анализ профилограмм показал, что различные типы дефектов влияют на износ по-разному. Это требует разработки специальных методов мониторинга износа и оптимизации параметров работы тормозной системы. Однако для получения наиболее точных результатов в исследовании необходимо применять комплексный подход, включающий как теоретический анализ существующих моделей тормозных колодок, так и разработку новых, более точных методов оценки их состояния, что может привести к созданию интеллектуальных систем мониторинга износа тормозных колодок в реальном времени и оптимизации параметров работы тормозной системы в целом. Внедрение современных методов оценки состояния тормозных колодок поможет уменьшить затраты на их закупку и утилизацию, а также приведет к сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу. Результаты исследования будут полезны при разработке новых стандартов и регламентов по эксплуатации и обслуживанию тормозных систем подвижного состава.

Ключевые слова

подвижной состав, тормозная система вагона, тормозная колодка, профилограмма, дефекты тормозных колодок, степень износа

Для цитирования

Методика построения профилограмм тормозных колодок пассажирского подвижного состава с различными видами дефектов и степенью износа / В.Р. Коновалов, Е.Ю. Дульский, Д.О. Емельянов, А.П. Буйносов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4 (84). С. 10–20. DOI 10.26731/1813-9108.2024.4(84).10-20.

Информация о статье

поступила в редакцию: 03.10.2024 г.; поступила после рецензирования: 02.11.2024 г.; принята к публикации: 11.11.2024 г.

Methodology for constructing profilograms of brake pads of passenger rolling stock with various types of defects and degree of wear

V.R. Konovalov¹✉, E.Yu. Dul'skii¹, D.O. Emel'yanov¹, A.P. Buinosov²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Ural State Transport University, Yekaterinburg, the Russian Federation

✉konovalovvlad190@gmail.com

Abstract

The article discusses the methodology for constructing profilograms of brake pads of passenger rolling stock with various types of defects and degrees of wear, which in the future may play an important role in reducing the wear of the brake pad of passenger rolling stock. This can improve the safety and efficiency of vehicles. Brake pads of passenger rolling stock with various types of defects and degrees of wear were scanned using a RangeVision Spectrum 3D scanner. The construction of profilograms at the final stage was carried out in the Kompas-3D automated design system, with the help of which profilograms were constructed in the form of two-dimensional images, which made it possible to determine the exact shape and dimensions of the pad in a given section. Analysis of the profilograms showed that different types of defects affect wear differently, which requires the development of special methods for wear monitoring and optimization of the brake system operating parameters. To achieve maximum efficiency, the study requires an integrated approach, including both a theoretical analysis of existing models and the develop-

ment of new, more accurate methods for assessing the condition of brake pads. The new research may lead to the creation of intelligent systems for monitoring brake pad wear in real time and optimizing brake system performance parameters. The introduction of new methods for assessing the condition of brake pads may result in a reduction in the costs of purchasing and disposing of pads, as well as a reduction in emissions of harmful substances into the atmosphere. The results of the research may be used to develop new standards and regulations for the operation and maintenance of rolling stock brake systems, which will improve the safety and efficiency of rail transportation.

Keywords

rolling stock, wagon brake system, brake pad, profilogram, defects of brake pads, degree of wear

For citation

Konovalov V.R., Dul'skii E.Yu., Emel'yanov D.O., Buinosov A.P. Metodika postroeniya profilogramm tormoznykh kolodok passazhirskogo podvizhnogo sostava s razlichnymi vidami defektov i stepen'yu iznosa [Methodology for constructing profilograms of brake pads of passenger rolling stock with various types of defects and degrees of wear]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, No. 4(84), pp. 10–20. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.4(84).10-20.

Article info

Received: October 3, 2024; Revised: November 2, 2024; Accepted: November 11, 2024.

Введение

Повышение эффективности торможения железнодорожного транспорта напрямую связано с безопасностью перевозок и экономической выгодой. Одной из ключевых составляющих тормозной системы является взаимодействие «колодка – колесо», которое влияет на качество торможения и эффективность функционирования поезда в целом.

Несмотря на существующие исследования, комплексное изучение взаимодействия «колодка – колесо» до сих пор не позволяет точно оценить многофакторность процесса трения и его влияние на эффективность торможения, а также выявить закономерности, позволяющие спрогнозировать степень и характер износа тормозных колодок.

Одним из основных способов оценки состояния поверхности тормозной колодки является анализ ее профилограммы.

Профилограмма – это графическое представление износа тормозных колодок, получаемое путем измерения их геометрических параметров в различных точках.

Исследования трибологических процессов в системе «колодка – колесо» представлены в работах [1–3], где были получены первые профилограммы тормозных колодок. Для этого использовался метод натурального графического переноса: на изношенную тормозную колодку накладывался лист бумаги, который плотно прижимался к ее рабочей поверхности, а затем с помощью графитных стержней по деформациям бумаги воспроизводился изношенный профиль колодки (рис. 1).

Целью исследования является разработка новой методики построения профилограмм тормозной колодки с использованием реверсивного инжиниринга.



Рис. 1. Первые профилограммы тормозных колодок после опытов

Fig. 1. First profilograms of brake pads after experiments

Процесс построения профилограмм

Построение профилограмм начинается с выбора тормозной колодки подвижного состава и подготовки ее поверхности к сканированию.

В рамках исследования были выбраны тормозные колодки пассажирских вагонов с различной степенью износа. Подготовка тормозных колодок для сканирования включает очистку от грязи и ржавчины для обеспечения точности последующих измерений (рис. 2).

Следующим этапом является сканирование подготовленной тормозной колодки для получения точной 3D-модели. В исследовании сканирование осуществлялось на 3D-сканере RangeVision Spectrum (рис. 3), особенностью

которого является высокая точность сканирования (0,25 мм).

Для определения точных размеров в полученной 3D-модели необходимо произвести постобработку, которая включает в себя очистку модели от лишних шумов, возникающих при сканировании.

На рис. 4 представлена 3D-модель отсканированной тормозной колодки, которая позволяет детально изучить геометрию колодки, включая ее износ и дефекты [4–12].



Рис. 2. Выбор тормозных колодок
Fig. 2. Selecting brake pads



Рис. 3. Внешний вид сканера RangeVision Spectrum
Fig. 3. External appearance of the scanner RangeVision Spectrum

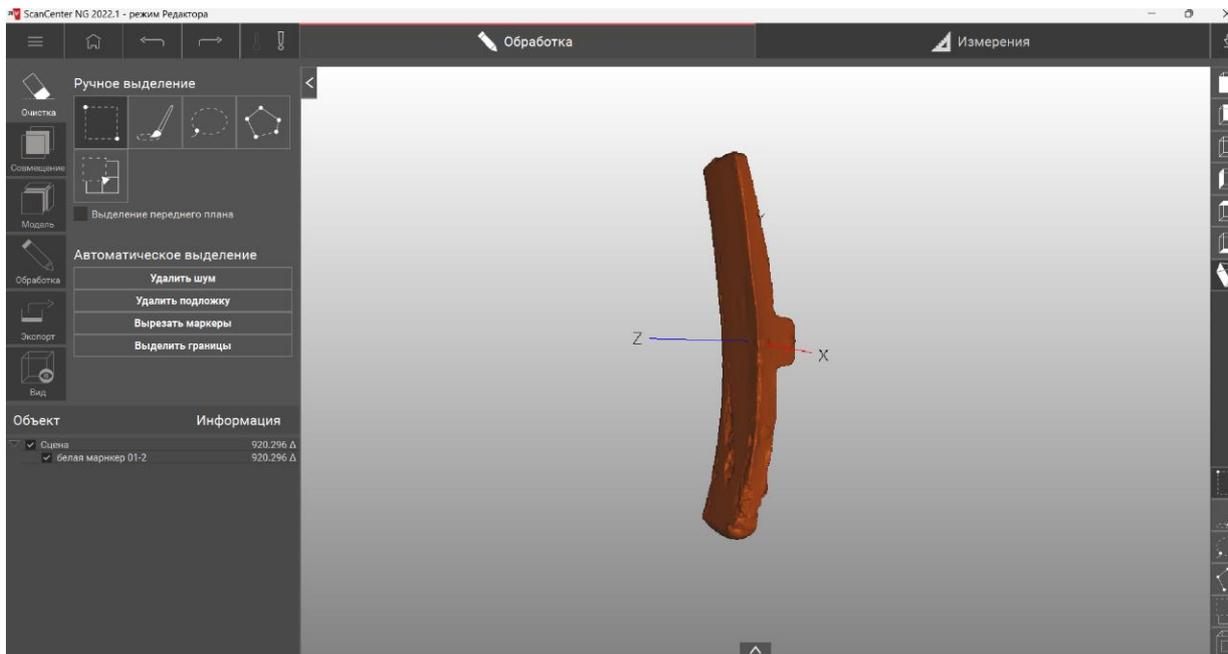


Рис. 4. Удаление лишних элементов
Fig. 4. Removing unnecessary elements

Следующим этапом построения профилограмм является процесс получения профиля сечения тормозной колодки.

Этот процесс осуществлялся путем сечения 3D-модели тормозной колодки перпендикулярной плоскостью по всей длине с определенным шагом.

На рис. 5 представлено построение плоскости сечения колодки путем нанесения линии сечения. Эта линия сечения проходит через 3D-модель колодки и позволяет создать двухмерный разрез колодки в заданной плоскости.

На рис. 6 представлено построение профиля сечения тормозной колодки в виде двухмерного изображения пересечения колодки плоскостью сечения, которая была построена ранее.

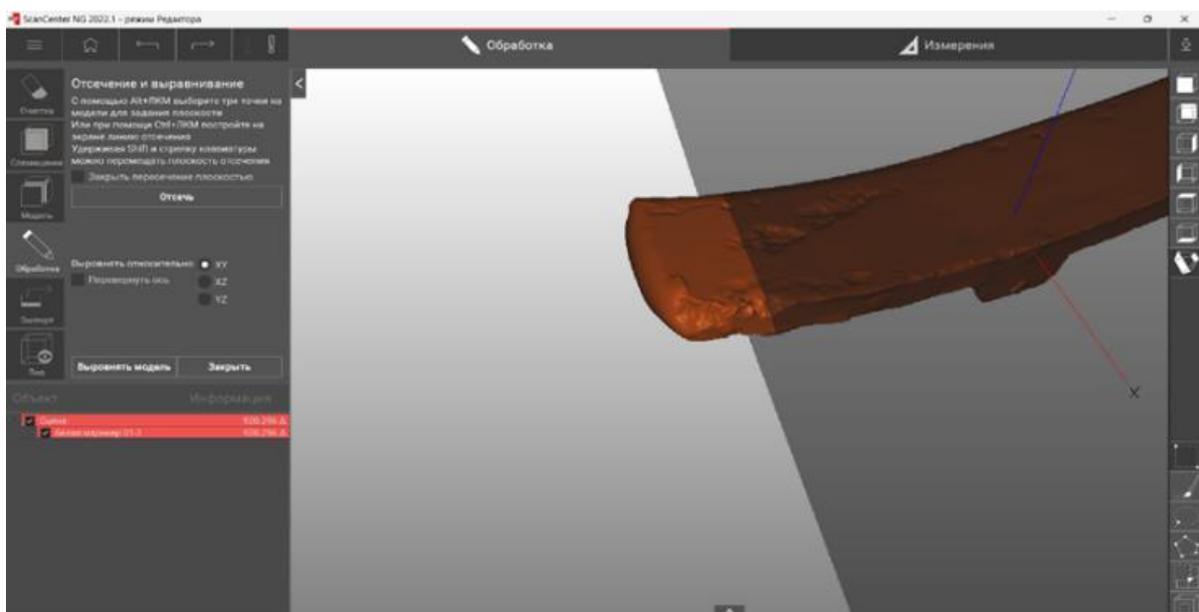


Рис. 5. Построение плоскости сечения колодки
Fig. 5. Construction of the section plane of the pad

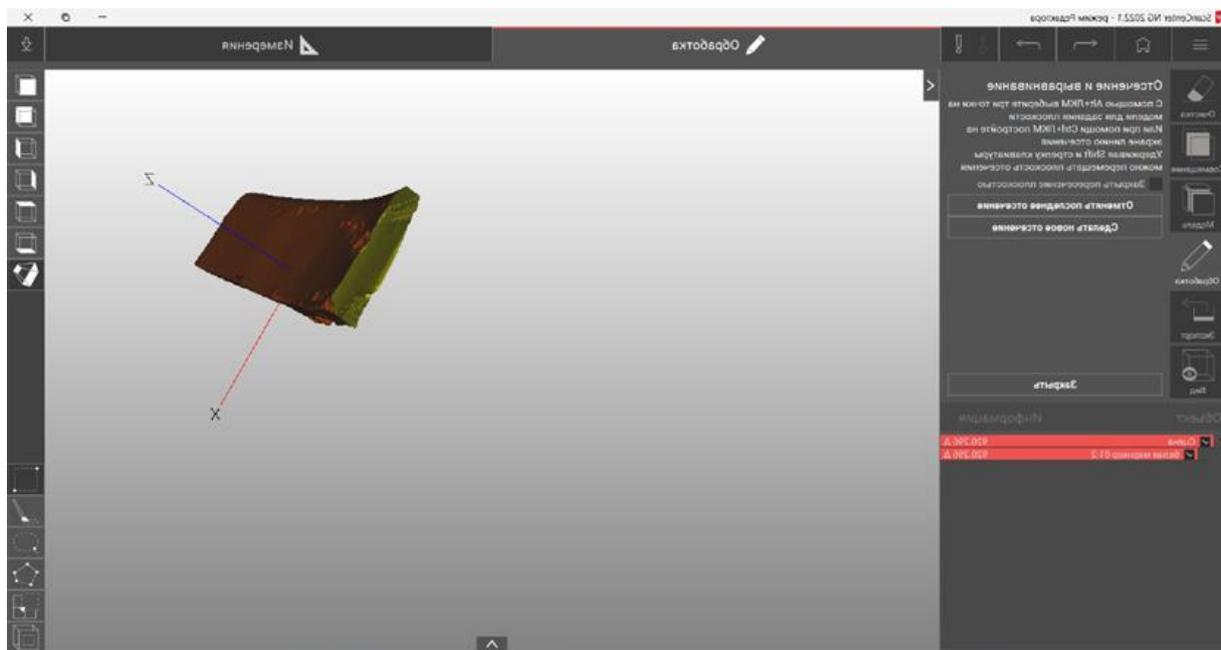


Рис. 6. Построение профиля сечения тормозной колодки
Fig. 6. Construction of the brake pad cross-section profile

После процесса отсечения приступим к экспорту 3D-модели в формате STL для удобства открытия в CAD-программе (рис. 7).

Экспорт трехмерной модели в формат STL является стандартной практикой, когда необходимо перенести сложные геометрические формы в CAD-программы для дальнейшего просмотра, анализа или модификации. Формат STL под-

держивается большинством программ для трехмерного моделирования. Его использование позволяет передавать детализированные данные о поверхностях объекта, что нужно для точных инженерных расчетов и планирования производственных процессов. В программе ScanCenter NG выбираем вкладку экспорт, задаем имя файлу, указываем путь его сохранения и

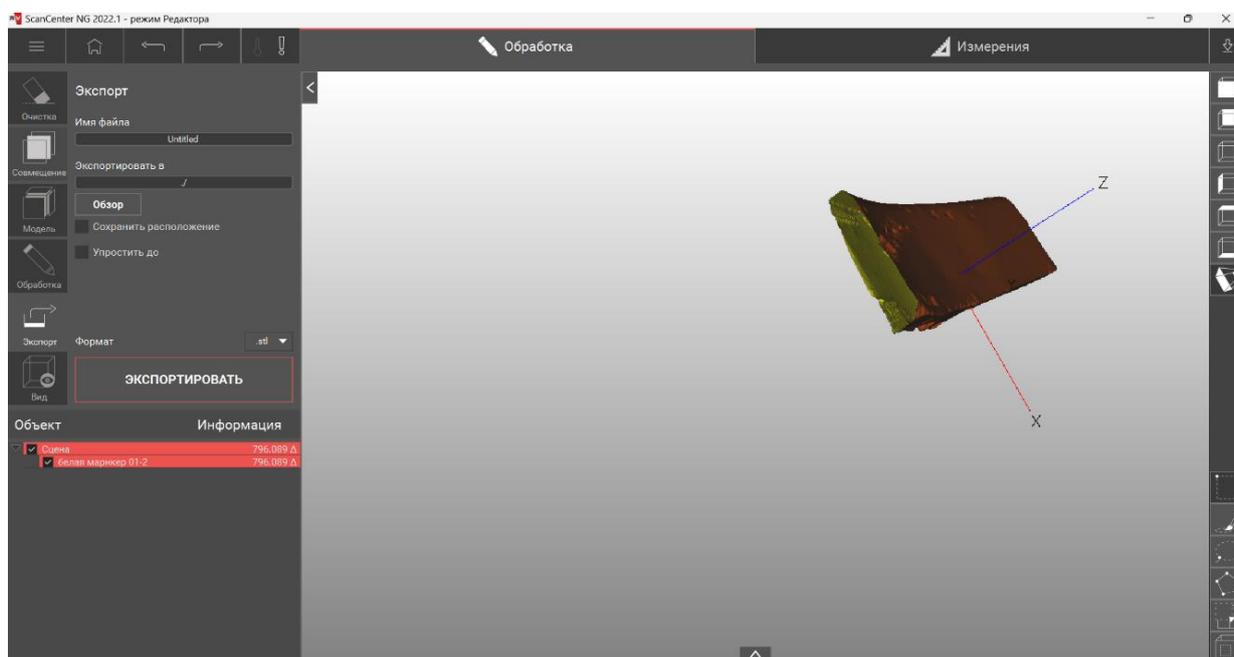


Рис. 7. Экспорт 3D-модели тормозной колодки
Fig. 7. Export of 3D model of brake pad

выбираем формат, в котором необходимо сохранить для работы в CAD-программах, следовательно, выбираем формат STL.

Произведем копирование контура в программе и экспортируем в программный комплекс «Компас» (рис. 8).

Для воспроизведения и детальной работы с контуром в программе «Компас» сначала необходимо скопировать контур из исходного CAD-файла. Затем экспортируемый контур можно импортировать в программный комплекс «Компас», который позволяет провести

дальнейшее моделирование или изменение деталей с высокой точностью. Это обеспечивает удобство работы с проектами и плавный переход от одного этапа проектирования к другому, сохраняя все ключевые параметры геометрии объекта.

Разработанная методика позволяет получать профилограммы тормозных колодок с различной степенью износа с целью дальнейшего их анализа. В рамках работы были отсканированы тормозные колодки с различной степенью износа и получены их профилограммы (рис. 9).

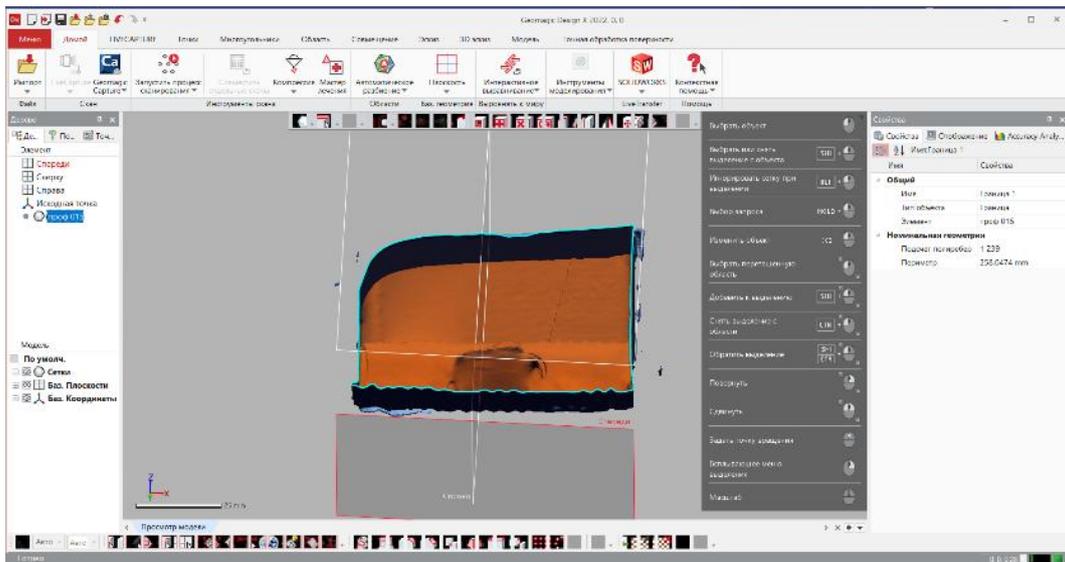


Рис. 8. Копирование контура
Fig. 8. Copying the contour

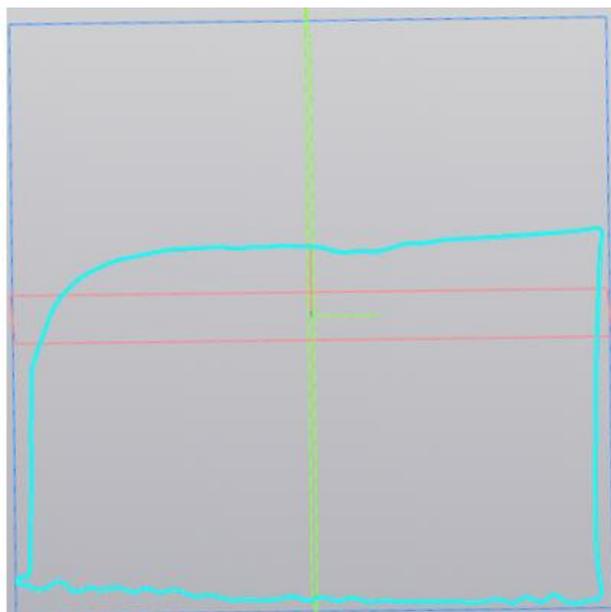


Рис. 9. Полученная профилограмма в программе «Компас»
Fig. 9. The resulting profilogram in the Kompas program

Далее рассмотрим пример проведения анализа тормозной колодки с износом типа «выщерблина» (рис. 10). Профилограммы колодок построены через 1 см. Для большей

наглядности все профилограммы были сведены последовательно и представлены на рис. 11.

На рис. 12 представлены совмещенные профилограммы с сечениями колодки.

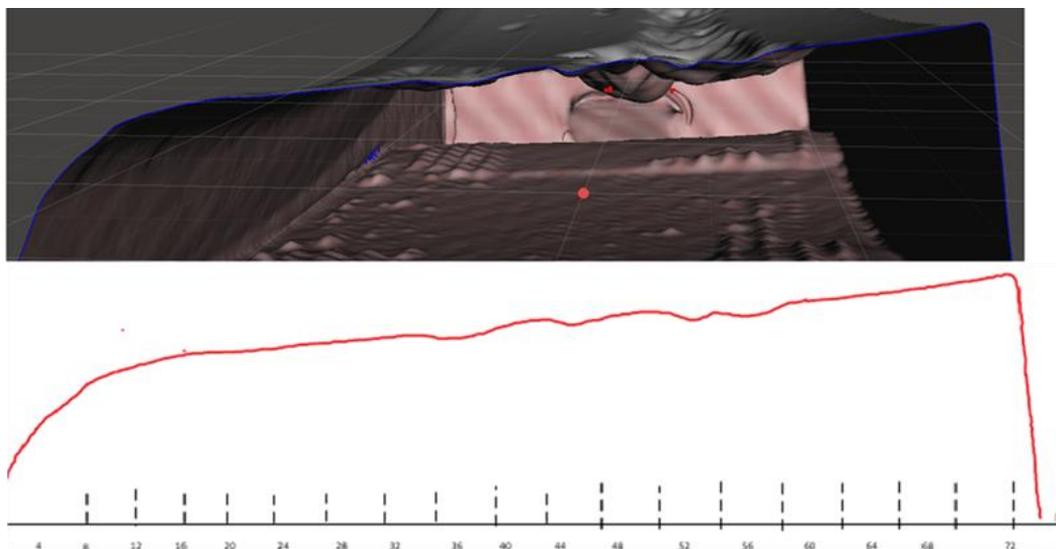


Рис. 10. Построение профилограммы тормозной колодки с сечением (вверху – сечение тормозной колодки, внизу – профилограмма)

Fig. 10. Construction of a profilogram of a brake pad with a section (top – section of the brake pad, bottom – profilogram)

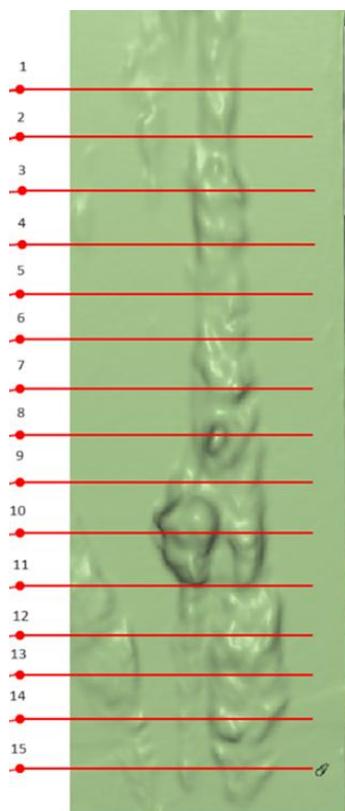


Рис. 11. Поверхность тормозной колодки с разбивкой по сечением для построения профилограмм

Fig. 11. Brake pad surface with a breakdown by section for constructing profilograms

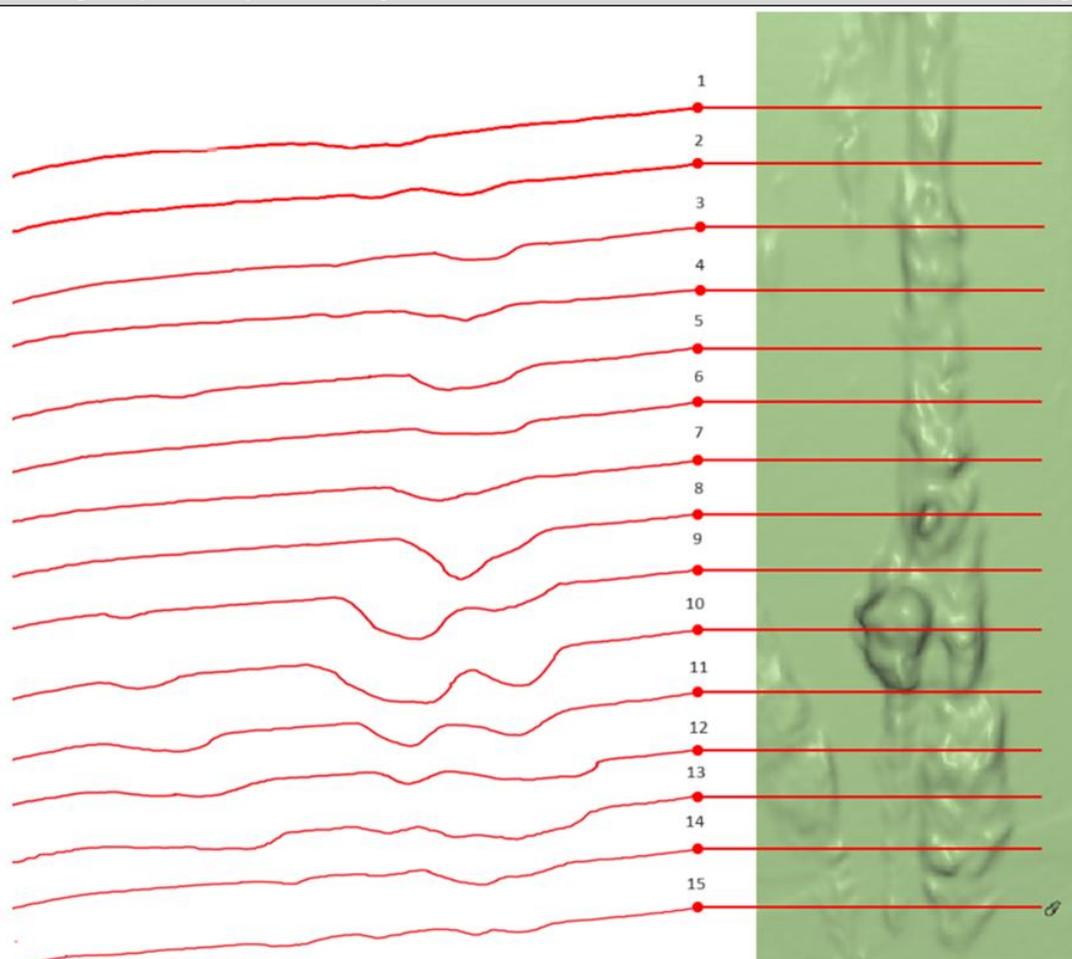


Рис. 12. Профилограммы тормозных колодок
Fig. 12. Brake pad profile diagrams

Анализ профилограмм тормозных колодок является важной процедурой, позволяющей оценить ее состояние и определить степень износа, а также наличие дефектов и их дальнейшее возможное распространение. Основываясь на анализе профилограмм, можно сделать следующий вывод: износ тормозной колодки от краев к центру имеет нарастающий характер, после чего резко увеличивается в зонах с максимальным износом (рис. 12).

Такое неравномерное изнашивание может быть связано с неправильной регулировкой тормозной системы, недостаточной смазкой, неправильным применением тормозных колодок или другими факторами [12–18]. Важно отметить, что неравномерный износ может привести к снижению эффективности торможения и увеличению риска нештатных ситуаций.

Понимание причин неравномерного износа тормозных колодок позволяет разработать меры по предотвращению этого явления, что

способствует более эффективной работе тормозной системы железнодорожного транспорта и, следовательно, повышению его безопасности.

Анализируя рис. 13, можно сделать вывод о будущих распределениях дефектов, дальнейшем износе, спрогнозировать направление износа.

Заключение

Методика построения профилограмм с использованием 3D-сканирования позволяет получать профилограммы тормозных колодок с различной степенью износа с целью дальнейшего их анализа на предмет выявления закономерностей этого процесса и прогнозирования остаточного ресурса колодки.

Разработанная методика позволит в дальнейшем выявлять зоны потенциального износа тормозной колодки при наличии определенного вида дефекта, что в конечном итоге будет способствовать установлению зависи-

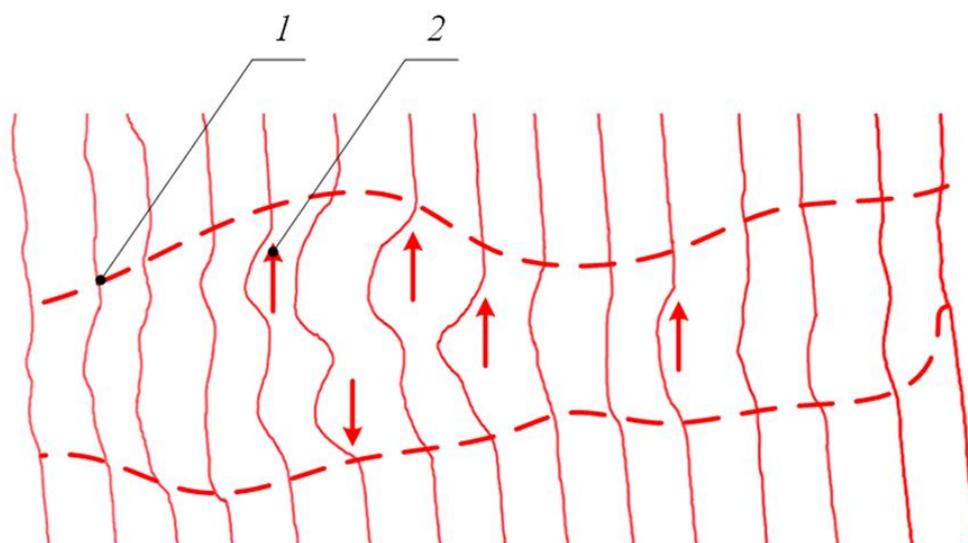


Рис. 13. Развитие дефектов на поверхности тормозной колодки:

1 – зона развития дефекта, 2 – направление развития дефекта

Fig. 13. Development of defects on the surface of the brake pad:

1 – defect development zone; 2 – defect development direction

мости ресурса колодки от конкретного вида износа и его размеров.

Исследование закономерностей формирования износа тормозных колодок при различных режимах эксплуатации (нажатии, изме-

нении состояния поверхностей, запыленности) позволяет в дальнейшем составлять уравнения регрессии для определения остаточного ресурса тормозной колодки.

Список литературы

1. Иванов П.Ю., Дульский Е.Ю., Емельянов Д.О. Реверсивный инжиниринг в исследовании элементов тормозных систем // Вестн. Уральск. гос. ун-та путей сообщ. 2023. № 3 (59). С. 80–86.
2. Пат. 2797930 Рос. Федерация. Стенд для исследования параметров тормозного прижатия колодки к колесу / А.М. Худоногов, Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов и др. № 2022118561 ; заявл. 06.07.2022 ; опубл. 13.06.2023, Бюл. № 17. 10 с.
3. Пат. 2792609 Рос. Федерация. Способ определения коэффициента трения трибологической пары по потребляемой электрической мощности электропривода / А.М. Худоногов, Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов и др. № 2022111793 ; заявл. 27.04.2022 ; опубл. 22.03.2023, Бюл. № 9. 13 с.
4. Галай Э.И., Рудов П.К. Проблемы торможения пассажирского состава // Локомотив. 2003. № 4. С. 30–32.
5. Карвацкий Б.Л. Общая теория автотормозов. М. : Трансжелдориздат, 1947. 300 с.
6. Попов Е.С., Шинский О.И. Анализ показателей качества колодок тормозных чугуновых и композиционных для железнодорожного подвижного состава // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 27–37.
7. Чебаков М.И., Данильченко С.А., Ляпин А.А. Моделирование контактного взаимодействия железнодорожного колеса и тормозной колодки с учетом износа, тепловыделения от трения и зависимости механических параметров от температуры // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2018. № 4 (200). С. 49–53.
8. Математическая модель работы тормозной системы поезда в процессе торможения с учетом динамики коэффициента трения колодки о колесо и сцепления с рельсом в компьютерной среде / А.А. Корсун, П.Ю. Иванов, С.П. Круглов и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 2 (86). С. 104–113.
9. РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар вагонов с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524 мм) : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств - участников Содружества от 19–20 окт. 2017 г. № 67 (ред. от 10.06.2024). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
10. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотра вагонов) № 808-2022-ПКБ-ЦВ: утв. Советом по железнодорожному транспорту Государств-участников Содружества от 8 дек. 2022 г. № 77 (ред. 10.06.2024). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
11. Венцевич Л.Е. Тормоза подвижного состава железных дорог. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2010. 560 с.
12. Крылов В.И., Клыков Е.В., Ясенцев В.Ф. Тормоза подвижного состава. М. : Транспорт, 1980. 271 с.
13. Пархомов В.Т. Устройство и эксплуатация тормозов. М. : Транспорт, 1994. 208 с.
14. Прогнозирование ресурса вновь проектируемых тормозных механизмов с учетом инновационных инженерных решений / Д.Г. Мясичев, С.П. Горбатов, А.С. Вашуткин и др. // Изв. СПб. лесотехнич. акад. 2021. № 234. С. 182–197.

15. Американские железнодорожные энциклопедии: вагоны / под ред. П.И. Травина. М. : Трансжелдориздат, 1937. 844 с.
16. The braking performance of pads for high-speed train with rigid and flexible structure on a full-scale flywheel brake dynamometer / W. Zhong, X. Zhang, Zh. Wang et al. // *Tribology International*. 2023. Vol. 179. DOI 10.1016/j.triboint.2022.108143.
17. 3D dynamic model of the railway wagon to obtain the wheel–rail forces under track irregularities / M. Naeimi, A.Z. Jabbar, M. Shadfar et al. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*. 2015. Vol. 229. Iss. 4. P. 357–369. DOI 10.1177/1464419314566833.
18. Talati F., Jalalifar S. Analysis of heat conduction in a disk brake system // *Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 45. P. 1047–1059. DOI <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0476-y>.

References

1. Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu., Emel'yanov D.O. Reversivnyi inzhiniring v issledovanii elementov tormoznykh system [Reverse engineering in the study of brake system elements]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2023, no 3 (59), pp. 80–86.
2. Khudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Emel'yanov D.O., Korsun A.A., Khamnaeva A.A., Kovshin A.S. Patent RU 2797930 C1, 13.06.2023.
3. Khudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Emel'yanov D.O., Korsun A.A., Khamnaeva A.A., Kovshin A.S., Treskin S.V. Patent RU 2792609 C1, 22.03.2023.
4. Galai E.I., Rudov P.K. Problemy tormozheniya passazhirskogo sostava [Problems of passenger train braking]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2003, no 4, pp. 30–32.
5. Karvatskii B.L. Obshchaya teoriya avtotormozov [The general theory of auto brakes]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1947. 300 p.
6. Popov E.S., Shinskii O.I. Analiz pokazatelei kachestva kolodok tormoznykh chugunnykh i kompozitsionnykh dlya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Analysis of quality indicators of cast iron and composite brake pads for railway rolling stock]. *Lit'e i metallurgiya* [Casting and metallurgy], 2021, no 1, pp. 27–37.
7. Khebakov M.I., Danil'chenko S.A., Lyapin A.A. Modelirovanie kontaktnogo vzaimodeistviya zheleznodorozhnogo koleasa i tormoznoi kolodki s uchedom iznosa, teplovydeleniya ot treniya i zavisimosti mekhanicheskikh parametrov ot temperatury [Modeling of the contact interaction of a railway wheel and a brake pad, taking into account wear, heat release from friction and the dependence of mechanical parameters on temperature]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki* [Bulletins of Higher Educational Organizations. The North Caucasus region. Series: Natural Sciences], 2018, no 4 (200), pp. 49–53.
8. Korsun A.A., Ivanov P.Yu., Kruglov S.P., Osipov D.V., Emel'yanov D.O. Matematicheskaya model' raboty tormoznoi sistemy poezda v protsesse tormozheniya s uchedom dinamiki koeffitsienta treniya kolodki o koleso i stopeniya s rel'som v komp'yuternoi srede [A mathematical model of the operation of the train's braking system during braking, taking into account the dynamics of the friction coefficient of the pad on the wheel and the coupling with the rail in a computer environment]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2022, no 2 (86), pp. 104–113.
9. RD VNIIZhT 27.05.01-2017. Rukovodyashchii dokument po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kolesnykh par vagonov s buksovymi uzlamy gruzovykh vagonov magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 (1524 mm): utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv - uchastnikov Sodruzhestva (Protokol ot 19–20 oktyabrya 2017 g. N 67 (red. ot 10.06.2024) [RD VNIIZHT 27.05.01-2017. Guidance document of the repair and maintenance of wheel sets of wagons with axle boxes of freight wagons of mainline railways of gauge 1520 (1524 mm): approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States (Protocol No 67 dated October 19–20, 2017 (ed. June 10, 2024)].
10. Instruksiya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu vagonov v ekspluatatsii (instruksiya osmotrshchiku vagonov) № 808-2022-PKB-TsV: utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu Gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva ot 08.12.2022 g. № 77 (red. 10.06.2024) [Instructions for the maintenance of wagons in operation (instructions to the inspector of wagons) No 808-2022-PKB-TsV: approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol No 77 dated December 8, 2022 (ed. June 10, 2024)].
11. Ventsevich L.E. Tormoza podvizhnogo sostava [Brakes of rolling stock of railways]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2010. 560 p.
12. Krylov V.I., Klykov E.V., Yasentsev V.F. Tormoza podvizhnogo sostava [Brakes of rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1980. 271 p.
13. Parkhomov V.T. Ustroistvo i ekspluatatsiya tormozov [Device and operation of brakes]. Moscow: Transport Publ., 1994. 208 p.
14. Myasishchev D.G., Gorbato S.P., Vashutkin A.S., Lorenz A.S. Prognozirovanie resursa vnov' proektiruemykh tormoznykh mekhanizmov s uchedom innovatsionnykh inzhenernykh reshenii [Forecasting the resource of newly designed braking mechanisms, taking into account innovative engineering solutions]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii* [Bulletins of the Saint Petersburg Forestry Academy], 2021, no 234, pp. 182–197.
15. Amerikanskie zheleznodorozhnye entsiklopedii: vagony [American Railway Encyclopedias: wagons]. Ed. Travin P.I. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1937. 844 p.
16. Zhong W., Zhang X., Wang Zh., Zhang X., Yan Q. The braking performance of pads for high-speed train with rigid and flexible structure on a full-scale flywheel brake dynamometer // *Tribology International*. 2023. Vol. 179. DOI

10.1016/j.triboint.2022.108143.

17. Naeimi M., Jabbar A.Z., Shadfar M., Esmaili M. 3D dynamic model of the railway wagon to obtain the wheel–rail forces under track irregularities // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2015, Vol. 229, iss. 4, pp. 357–369. DOI 10.1177/1464419314566833.

18. Talati F., Jalalifar S. Analysis of heat conduction in a disk brake system // Heat and Mass Transfer, 2009, Vol. 45, pp. 1047–1059. DOI <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0476-y>.

Информация об авторах

Коновалов Владислав Романович, аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: konovalovvlad190@gmail.com.

Дульский Евгений Юрьевич, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: e.dulskiy@mail.ru.

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

Буйносов Александр Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрической тяги, Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург; e-mail: byinosov@mail.ru.

Information about the authors

Vladislav R. Konovalov, Ph.D. Student of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: konovalovvlad190@gmail.com.

Evgenii Yu. Dul'skii, Doctor in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: e.dulskiy@mail.ru.

Denis O. Emel'yanov, Ph.D. Student of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: emelyanovdenis1995@mail.ru.

Alexander P. Buinosov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Traction, Ural State Transport University, Yekaterinburg; e-mail: byinosov@mail.ru.

Перспективы использования цифровой модели железнодорожного пути в рамках планирования и организации работ

Е.Н. Тимофеев✉, А.А. Севостьянов

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Россия

✉egtini@vk.com

Резюме

Цифровая модель – это инструмент, который отображает виртуальный набор информации о реальных объектах или их комплексе. Применение этой модели охватывает широкий круг задач, в том числе в транспортной отрасли, в частности на железнодорожном транспорте. Статья содержит рекомендации, разработанные на данных, полученных с помощью аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов и специализированных программных комплексов. Эти сведения позволяют создать концепцию по внедрению цифровой модели в структурные подразделения ОАО «РЖД». В частности, определены методы и источники обновления базы данных, а также учтены изменения, актуализирующие состояние объектов инфраструктуры. Основными преимуществами использования цифровой модели являются возможности наглядного и интуитивного представления информации, что существенно облегчает выбор рационального решения специалистом. Такая модель позволяет не только визуализировать текущие состояния объектов, но и разрабатывать и тестировать различные сценарии оперативного вмешательства или предупреждения. Это помогает оптимизировать процесс работы, минимизировать вероятность возникновения проблем и повышать общую эффективность производственной деятельности. Рассмотрение конкретных примеров применения цифровых моделей в железнодорожной отрасли показывает, что они могут значительно улучшить качество и оперативность принятия решений. На определенном участке пути был проведен анализ данных, полученных с цифровой модели. По его результатам можно говорить о высокой эффективности этого инструмента. По итогам исследования были представлены сведения, которые имеют практическое значение и могут быть использованы для дальнейшего развития цифровых моделей в различных областях железнодорожного транспорта. Кроме того, цифровая модель открывает новые горизонты для улучшения процесса управления инфраструктурой, а выходные данные позволяют судить о ее пригодности для дальнейшей обработки и прогнозирования изменений. Системы мониторинга, основанные на цифровых моделях, могут стать важным инструментом для поддержания высокого уровня безопасности на железной дороге, а также для повышения эффективности логистических и управленческих процессов. В заключении подчеркивается, что инновационные подходы, в том числе применение цифровых моделей и беспилотных летательных аппаратов, играют ключевую роль в цифровизации железнодорожной отрасли. Исследования и разработки в этом направлении продолжают доказывать свою значимость и перспективность, создавая предпосылки для улучшения транспортных систем.

Ключевые слова

цифровая модель, инфраструктура, железнодорожный транспорт, аэрофотосъемка, контроль рисков, база данных

Для цитирования

Тимофеев Е.Н. Перспективы использования цифровой модели железнодорожного пути в рамках планирования и организации работ / Е.Н. Тимофеев, А.А. Севостьянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4 (84). С. 21–31. DOI 10.26731/1813-9108.2024.4(84).21-31.

Информация о статье

поступила в редакцию: 02.08.2024 г.; поступила после рецензирования: 05.12.2024 г.; принята к публикации: 06.12.2024 г.

Prospects for the use of a digital railway track model within the framework of planning and organization of works

E.N. Timofeev ✉, A.A. Sevost'yanov

Siberian Transport University, Novosibirsk, the Russian Federation

✉egtini@vk.com

Abstract

A digital model is a tool that displays a virtual set of information about real objects or their complex. The application of this model covers a wide range of tasks, including the transport industry, in particular rail transport. This article contains developed recommendations based on data obtained by means of aerial photography using unmanned vehicles and specialized software systems. These data allow to create a concept for the implementation of a digital model in the structural divisions of JSC «Russian Railways». In particular, the methods and sources of updating the database have been identified, as well as changes that update the state of infrastructure facilities have been taken into account. The main advantages of using a digital model are the

possibilities of visual and intuitive presentation of information, which greatly facilitates the choice of a rational solution by a specialist. Such a model allows not only to visualize the current conditions of objects, but also to develop and test various scenarios of operational intervention or prevention. This helps to optimize the work process, minimize the likelihood of problems and increase the overall efficiency of production activities. Consideration of specific examples of the use of digital models in the railway industry shows that they can significantly improve the quality and efficiency of decision-making. An analysis of the data obtained from the digital model was carried out on a specific section of the route. The evaluation showed the high efficiency of this tool. As a result of the research, data were presented that are of practical importance and can be used for further development of digital models in various fields of railway transport. In addition, the digital model opens up new horizons for improving the infrastructure management process. The output data allows us to judge the suitability for further processing and forecasting changes. Monitoring systems based on digital models can become an important tool for maintaining a high level of safety on the railway, as well as for improving the efficiency of logistics and management processes. In conclusion, it is emphasized that innovative approaches, including the use of digital models and unmanned aerial vehicles, play a key role in the digitalization of the railway industry. Modern technologies make it possible not only to increase safety and efficiency, but also to create conditions for sustainable infrastructure development. Research and development in this area continues to prove its importance and prospects, opening up new opportunities for improving transport systems.

Keywords

digital model, infrastructure, railway transport, aerial photography, risk control, database

For citation

Timofeev E.N., Sevost'yanov A.A. Perspektivy ispol'zovaniya tsifrovoy modeli zheleznodorozhnogo puti v ramkakh planirovaniya i organizatsii rabot [Prospects for the use of a digital railway track model within the framework of planning and organization of works]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, No. 4(84), pp. 21–31. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.4(84).21-31.

Article Info

Received: August 2, 2024; Revised: December 5, 2024; Accepted: December 6, 2024.

Введение

Цифровые технологии и инструменты активно внедряются в разные сферы во всем мире, в частности и в железнодорожную отрасль [1]. Эффективность управленческих решений при возникновении отказов и неисправностей напрямую зависит от оперативности получения информации. В Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой (ЕК АСУИ) хранится обширная база данных, однако в настоящее время она разрознена и может показаться агрессивной средой для пользователя на интуитивном уровне. На рис. 1 представлен пример разнообразности выходных форм.

Например, сведения о техническом состоянии подвижного состава хранятся отдельно от данных о состоянии путевой инфраструктуры (ЕК АСУИ СДМИ) [2]. В случае возникновения инцидента, например, вследствие пучин, требуется оперативный доступ к данным о пучинных местах, геометрии рельсовой колеи и выполненных работах. Однако лица, принимающие решения, не всегда имеют оперативный доступ к необходимой информации. В настоящее время работники структурных подразделений при натурных осмотрах ведут физические записи о пучинных местах и лентах предупреждения. Линейные участки расположены на достаточном

удалении как друг от друга, так и от технического отдела, где консолидируется вся информация об объектах инфраструктуры, что приводит к задержкам в получении информации. Для сокращения времени на принятие решений необходимо объединить разрозненные данные в ЕК АСУИ, обеспечить их оперативную доступность для лиц, принимающих решения, и снизить зависимость от использования физических носителей информации. Это позволит повысить эффективность организации работ по управлению техническим состоянием объектов инфраструктуры, что в конечном итоге сократит потери времени на принятие решений.

Мониторинг обслуживаемых участков железной дороги одна из важных задач, которая может быть решена за счет цифровых технологий. В частности, отслеживание изменений на участках, подверженных деформациям. Деформация земляного полотна может возникать по многим причинам: от изменения нагрузки до воздействия природных факторов. Цифровая модель деформирующегося участка дороги помогает определить возможные проблемы на нем, разработать меры по их предотвращению, а также редактировать модель и обновлять информацию при необходимости.

Обновление баз данных на цифровой модели железной дороги одна из важнейших за-

дач для обеспечения эффективного и безопасного функционирования железнодорожного транспорта [3]. База данных цифровых моделей дорог должна содержать информацию о параметрах верхнего и нижнего строения пути, конструктивных элементах, геодезической сети, нагрузках и деформациях участков, а также о

многих других факторах, влияющих на работу железной дороги. Обновление баз данных позволяет отслеживать изменения в условиях эксплуатации, принимать актуальные решения в области обслуживания и ремонта дороги, а также улучшать эффективность и безопасность железнодорожного транспорта в целом.

раздельные пункты					
мосты и тоннели, переезды		Ведомость искусственных сооружений Па 01.01.20xx г.			
продольный профиль					
план линии		Таблица 22. Профиль пути, км			
установленная скорость пасс./гр., км/ч					
груз-сть (млн т брутто/1 км в год)/класс и спец-ия линии/класс и код группы					
№ километра (длина нестандартного километра)		2	3	4	
Условия эксплуатации	пропущенный тоннаж, млн т брутто на 1 км	величина на 01.01.22 г.	527,3	527,3	341,9
		протяженность на 01.01.22 г.	185	614	607
Рельсы	тип рельсов, тип пути, категория рельсов, термоупрочнение, завод - изготовитель, год укладки	характеристики на 01.01.22 г.	K 88		
		характеристики на 01.01.23 г.	K 88		
Рельсы	приведенный и боковой износ рельсов, мм (протяженность - в м нити)	приведенный боковой на 01.01.22 г.			
		протяженность на 01.01.22 г.			
Рельсы	число замененных в одиночном порядке дефектных и о/дефектных рельсов, шт. за год/с начала укладки	на 01.01.22 г.	0 / 1	0 / 13	0 / 6
		на 01.01.23 г.	0 / 1	0 / 13	0 / 3
Рельсы	число дефектных рельсов, шт./м нити	на 01.01.22 г.	0 / 0	0 / 0	0 / 0
		на 01.01.23 г.	0 / 0	0 / 0	0 / 0
Рельсы	Тип промежуточного скрепления / процент негодных на километре	тип на 01.01.22 г.	ДО		
		% на 01.01.22 г.	9	25	32
Рельсы	Эпюра, род шпал, количество шпал, переводных и мостовых брусьев/ количество негодных, шт.	эпюра, род на 01.01.22 г.	1768/0		
		количество на 01.01.22 г.	1897/0С212		
Рельсы	род и толщина балласта	протяженность на 01.01.22 г.	1745/0С76		
		протяженность на 01.01.23 г.	1768/0		
Рельсы	загрязненность балласта более 30% / количество шпал с выплесками	загрязненность на 01.01.22 г.	1897/4С212		
		протяженность на 01.01.23 г.	1745/2С76		
Рельсы	Георешетка и разделительный слой	на 01.01.22 г.			
		на 01.01.23 г.			
Ремонты	год последнего капитального ремонта, реконструкции, строительства	на 01.01.22 г.	88	88	22
		на 01.01.23 г.	95		
Ремонты	потребность в ремонте	на 2023 г.	0,80		
		на 2023, 2024, 2025 г.	0,00		

Рис. 1. Вывод информации о состоянии путевого хозяйства
Fig. 1. Output of information on track facilities status

Для обновления цифровой модели железной дороги на основе съемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) нужны обоснования из-за высокой стоимости и трудозатратности процесса. Выполнение ремонтных работ – неотъемлемая часть операций для стабильного функционирования железнодорожного комплекса, и вследствие обновления материальной части требуется обновление цифрового облака для железной дороги, в результате чего мы сможем определить фактические границы проведения ремонта и в рамках жизненного цикла проанализировать изменения в комплексе объектов. Такие мероприятия важны для оценки эффективности реконструкции участков железнодорожного пути, выступающих «узким местом» по грузопотоку (например, участки Байкало-Амурской магистрали).

С целью мониторинга за деформациями из-за сезонных изменений, протекающих в грунтовом массиве или балластном слое, необходимо обновление цифрового облака для обозначения положения откосов, чтобы иметь актуальные данные об участках, зарегистрированных в паспорте неустойчивого или деформирующегося земляного полотна (ПУ-9), и выполнять анализ и контроль изменений.

Цифровые модели могут служить эффективным инструментом для управления текущим содержанием железных дорог в объеме планирования площадных работ, а именно удаление растительности или снегоборьба, сведя планирование к моделированию распределения трудозатрат техническим отделом дистанции пути на выполнение технических операций. Ввиду виртуального пространства возможно проводить моделирование различных операционных сценариев, тем самым приняв наиболее оптимальное решение для выполнения необходимых работ [4].

Цель выполненной работы заключается в исследовании применения цифровой модели в железнодорожной отрасли на основе данных, полученных с помощью аэрофотосъемки посредством БПЛА и специализированных программных комплексов. Разработка рекомендаций по внедрению цифровой модели в структурные подразделения ОАО «РЖД» и выявление потенциала цифровых моделей для улучшения управления инфраструктурой и повышения общей эффективности производствен-

ной деятельности также включены в тему исследования.

Материалы и методы исследования

В процессе исследования проанализированы основные отчетные формы для формирования базы данных цифровой модели. По техническому паспорту дистанции пути определены основные характеристики путевого хозяйства, а именно с графической части перенесены иллюстрационные материалы, несущие информацию о состоянии всего верхнего строения пути, а также определено положение кривой с сохранение ее параметров. Взята информация из ПУ-9, вынесены области деформации и в свойства сохранены сведения о наименовании отступления. Из журналов искусственных сооружений, устроенных на исследуемом участке, сохранены основные технические характеристики – год устройства, материалы исполнения, величина водопропускного отверстия или размер «в свету» соответственно для труб и мостов.

Создание цифровой модели осуществлялось на основе процесса моделирования в специализированном программном продукте Metashape посредством натурной съемки, которая выполнена согласно технологическому процессу [5] и с соблюдением общих норм и требований охраны труда [6], что позволило произвести качественную съемку [7, 8]. В качестве основных документов использовались отчеты, содержащие информацию о техническом состоянии объектов, в частности путевого хозяйства, которые позволяют более эффективно управлять объектами инфраструктуры, выявлять проблемные места и принимать оперативные меры по их ликвидации. Данные отчеты построены на основе актуальных параметров, которые обновляются в реальном времени и содержат информацию о различных аспектах, связанных с работой объектов, например, о технических характеристиках, ремонтных работах и т.д.

Обновление базы данных цифровой модели обычно проводится по мере поступления новых сведений о состоянии объектов инфраструктуры. Они могут поступать из различных источников, в том числе по результатам регулярных обследований объектов или проведенных работ. Обновление может проводиться и в случае изменений в окружающей среде, которые могут повлиять на техническое состояние объектов.

Процесс обновления базы данных цифровой модели включает в себя обработку новой информации и ее внесение в базу с целью актуализации сведений о состоянии объектов инфраструктуры. Но стоит отметить не только обработку новых данных, но и проверку и анализ уже имеющейся информации, чтобы убедиться в ее точности и достоверности.

Прикладное применение в структурных подразделениях ОАО «РЖД»

В предыдущих работах рассматривался вопрос создания цифровой модели железнодорожного пути с использованием БПЛА [8]. Получение цифровой модели позволяет специалистам различных структурных подразделений наполнять и анализировать ее.

В контексте выполнения цифровизации железной дороги представляется возможным реализовать взаимосвязь с ЕК АСУИ, через которую осуществляется привязка с реальными объектами инфраструктуры. Это позволит специалистам различных подразделений, ответственных за тот или иной объект, иметь доступ к актуальной и полной информации о его состоянии [9].

Цифровая модель позволяет создать точную кривую, включая ее радиус, длину, возвышение и другие параметры [10], уже напрямую основываясь на координатном методе с погрешностью в долях сантиметров относительно глобальной системы координат [11, 12]. Возможность оперативного доступа к цифровой модели руководителя структурного подразделения позволяет повысить эффективность принятия решений с адресной привязкой к месту работы, наглядно отображая кривую [13], облегчая ее анализ и понимание. В настоящее время планирование текущего содержания и ремонта пути осуществляется на основе данных, которые поступают из различных источников: осмотры пути, измерения геометрических параметров пути и т.д. Эти сведения часто разрознены и не всегда оперативны [14].

Например, специалисты службы пути смогут использовать цифровую модель для планирования необходимых работ. На рис. 2 представлены выходные данные, которые сегодня представляют оперативную доступность, и данные, которые станут оперативно доступны после приведения модели.

Для зданий применительна практика цифровых моделей с этапов проектирования нового строительства или реконструкции оцифрованных сооружений [15]. Теперь же благодаря внедряющимся инструментам аэрофотосъемки специалисты службы дистанций гражданских сооружений могут с точностью определить объемы необходимого ресурса для выполнения ремонтных работ и также имеют возможность виртуального моделирования для оптимального размещения нового капитального строения или временного устройства. Предварительная визуализация скрытых инженерных коммуникаций снижает вероятность повреждений или сбоев в работе систем.

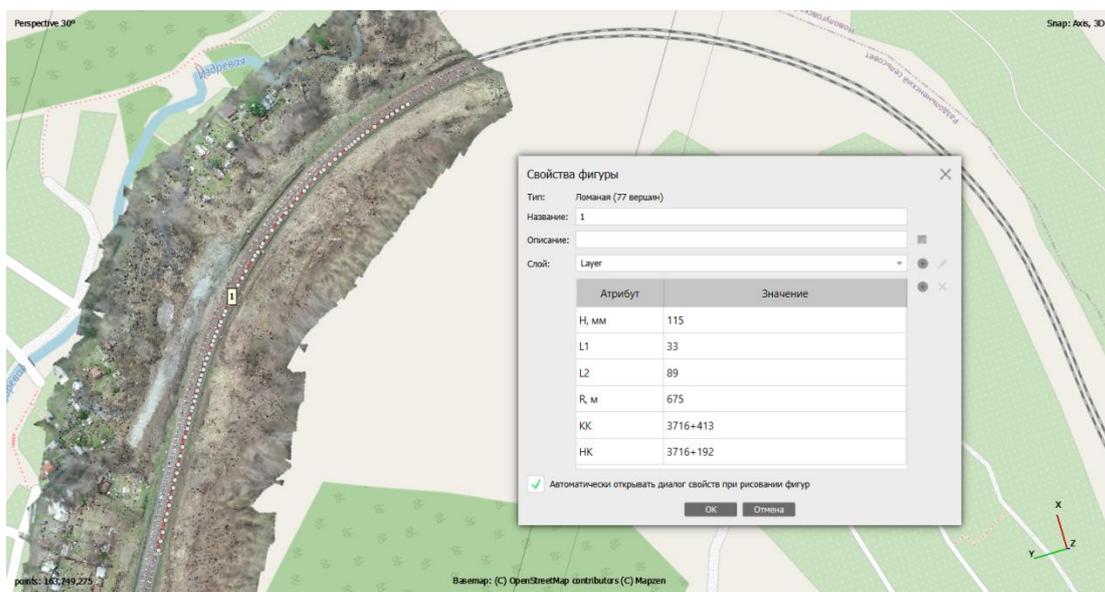
Таким образом, создание цифровой модели железнодорожного пути и ее интеграция в общую вероятную архитектуру ЕК АСУИ открывает широкие возможности для повышения эффективности управления и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры. Специалисты различных подразделений смогут получить доступ к актуальной и полной информации о состоянии объектов, что позволит им принимать более обоснованные и оперативные решения.

Одной из ключевых задач дирекций диагностики и мониторинга является регулярная оценка состояния полосы отвода железных дорог. Для этого используются технологии дистанционного зондирования, среди которых все большее применение находят аэрофотосъемки и информация, получаемая для анализа после камеральной обработки. Эти данные имеют важнейшее значение для своевременного выявления и предотвращения опасных ситуаций, связанных с состоянием прилегающих территорий. Современные технологии позволяют решать эту задачу на качественно новом уровне, выполняя поверхностное изменение полосы отвода в границах области интереса в зависимости от периодичности выполненных съемок.

Традиционно оценка состояния полосы отвода осуществлялась на основе обследований, проводимых инженерами и техниками непосредственно на месте. Этот трудоемкий и ресурсоемкий подход зачастую не позволял обеспечить достаточную периодичность мониторинга, особенно на протяженных участках железных дорог. Кроме того, визуальный осмотр и точечные измерения не давали полной картины происходящих изменений, особенно на участках с труднодоступным рельефом.

Местоположение						Длина круговой кривой м	R, м	H, мм
НК		КК		L1	L2			
км	м	км	м					
4	5	6	7	8	9	10	11	12
3716	192	3716	413	33	89	99	675	115

а



б

Рис. 2. Прикрепление кривых:
а – отчетная форма таблицы; б – цифровая кривая

Fig. 2. Attaching curves:

а – reported table form; б – digital curve

Применение технологий дистанционного зондирования Земли (аэрофотосъемки и спутниковой съемки) значительно расширяет возможности региональных центров диагностики и мониторинга (РЦДМ). Регулярное получение многоракурсных изображений полосы отвода позволяет выявлять и отслеживать даже незначительные изменения ее состояния. При этом точность и детализация данных съемки позволяют выполнять поверхностное изменение границ полосы отвода с высокой точностью. На рис. 3 представлена отчетная форма зарегистрированного деформационного участка и его цифровое представление, которое повышает доступ к участку и дает специалистам возможность виртуально обследовать его.

Ключевым преимуществом такого подхода является возможность проводить мониторинг в границах конкретных областей интереса, где существуют риски для безопасности железнодорожной инфраструктуры. Участки с оползневыми, селевыми или эрозионными процессами, зоны с высокой штормовой активностью и т.д. [16]. Детальные данные дистанционного зондирования позволяют своевременно выявлять изменения ситуации в этих критических зонах и оперативно реагировать на них.

Кроме того, накопление массива регулярных съемок одних и тех же участков полосы отвода дает возможность построения подробных трехмерных моделей местности с привязкой к пространственно-временным данным.

Это существенно повышает наглядность и эффективность анализа происходящих изменений.

Традиционные методы контроля состояния искусственных сооружений, таких как мосты, путепроводы, водопропускные трубы и т.д., заключались в периодических визуальных осмотрах и инструментальных измерениях. Этот трудоемкий и ресурсозатратный подход не всегда обеспечивал своевременное выявление развивающихся дефектов и деформаций. Кроме того, некоторые объекты расположены в труднодоступных местах.

На рис. 4 можно выполнять мониторинг проектно-высотного положения частей оголовка трубной части. Сравнение 3D-моделей, построенных по данным последовательных съемок,

позволяет выявлять даже незначительные смещения и деформации конструкций. Это дает возможность своевременно диагностировать развитие отклонений, оценивать их критичность и принимать необходимые меры для предотвращения аварийных ситуаций.

Особую ценность для структурных подразделений РЦДМ и дистанций инженерных сооружений представляет возможность дистанционного мониторинга объектов, расположенных в труднодоступных районах. Например, водопропускные трубы, расположенные в горных или заболоченных местностях, зачастую были вне зоны регулярного визуального контроля. Теперь, используя данные аэрофотосъемки и спутниковых снимков, специалисты

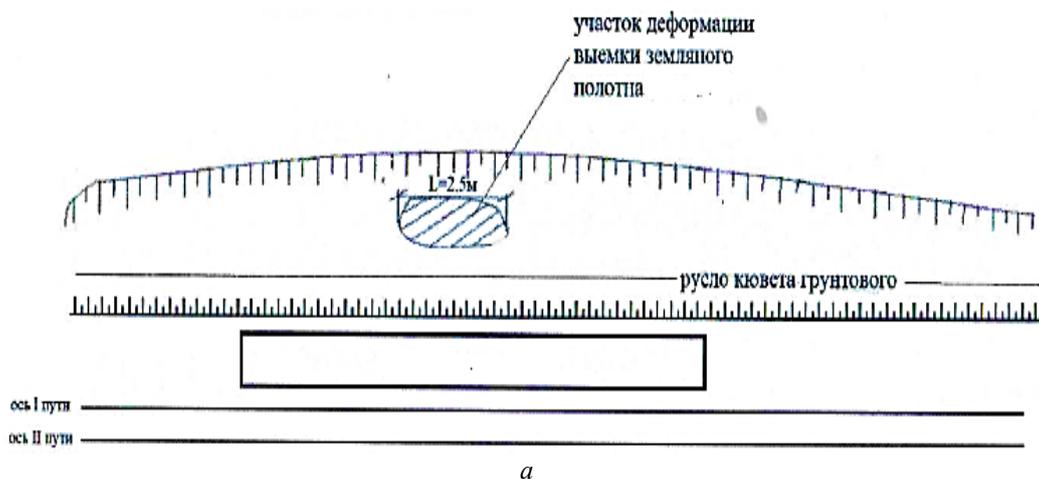
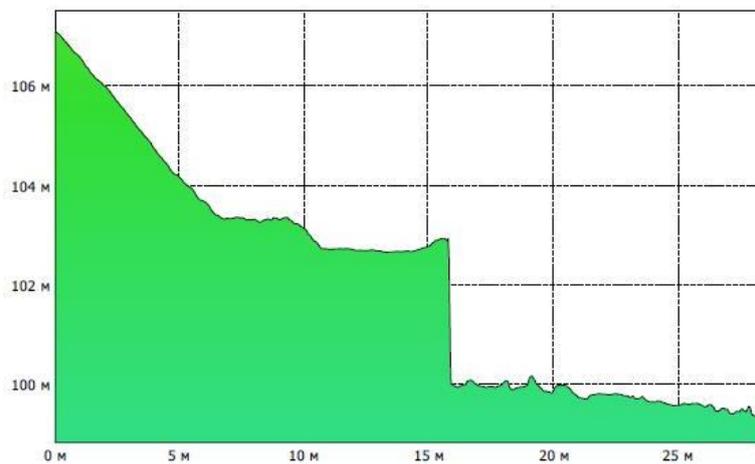


Рис. 3. Участок деформации:
a – карточка деформационного участка; *б* – цифровая модель

Fig. 3. Deformation area:
a – deformation area card; *б* – digital model



а



б

Рис. 4. Обследование искусственных сооружений:

- а – цифровая модель проектно-высотного положения частей оголовка трубной части;
 б – поперечный профиль места расположения оголовка трубной части

Fig. 4. Survey of artificial structures:

- а – digital model of the design-height position of the parts of the pipe section head;
 б – transverse profile of the location of the pipe section head

могут отслеживать состояние таких объектов, выявлять деформации, заиливание, зарастание растительностью и своевременно реагировать на возникающие проблемы.

Кроме того, накопление архива регулярных съемок инфраструктурных объектов позволяет создавать их подробные 3D-модели с привязкой к пространственно-временным данным. Это дает возможность не только оперативно отслеживать текущее состояние, но и анализировать динамику изменений за дли-

тельные периоды, в разные периоды сезонности года [17].

Результатом исследования является уточнение сфер применения цифровой модели для заинтересованных структурных подразделений в работе с цифровой моделью железнодорожного участка. Данный алгоритм обеспечивает возможность проведения эффективного мониторинга и обслуживания железных дорог с целью обеспечения безопасности и комфорта пассажиров и грузоперевозок. Данная разработка ориен-

тирована на научное исследование объектов в области технологии мониторинга на железнодорожном комплексе.

Периодическая съемка с БПЛА и создание цифровых моделей является важным инструментом для мониторинга изменений на территории объекта, его технического состояния, а также для выполнения ряда практических задач. Рекомендуется проводить плановые съемки в весенний и осенний сезоны. Весенняя съемка обычно проводится после схода снега, что позволяет получить актуальные данные о состоянии дороги и окружающей территории. Осенняя съемка проводится перед началом снегопадов и выводом дорог в зимний режим. Возможны съемки и в другие сезоны. Летом при съемке объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта можно получить важную информацию для путевого хозяйства, например, данные о состоянии зеленых насаждений вдоль железнодорожных путей, и понять, нуждается ли территория в дополнительной обработке и уборке. Зимняя съемка, в свою очередь, является более трудоемкой ввиду короткого светового дня и более быстрой разрядки батареи БПЛА, но материалы, полученные по итогу, могут служить основой для дальнейшего анализа снеготаносимости участков и величины снегового покрова, предоставляя тем самым дополнительную информацию по возможному укреплению или сооружению необходимых инженерных сооружений с целью предупреждения сезонных пучин и т.д.

Стоит сказать о внеплановых съемках, которые могут проводиться для профильных заданий, в частности после возникновения инцидентов, для уточнения информации по запросу об устройстве нижнего или верхнего строения пути с детализацией и геоинформационной привязанностью. Отметим, что беспилотные системы сегодня активно развиваются, вследствие чего необходимо автоматизировать идентификацию проблем безопасности с автоматическим обнаружением отступлений на основе накопленных баз данных [18].

Заключение

На основе проведенной работы по наполнению баз данных с железной дороги на цифровую модель согласно развитию корпоративных систем можно сделать вывод о возможности качественного изменения мониторинга ин-

фраструктуры. Создание подробных цифровых паспортов инфраструктурных объектов, включающих в себя цифровые модели, пространственно-временные данные об изменениях состояния, результаты диагностики и ремонтов, позволит структурным службам дорог перейти на качественно новый уровень управления и обслуживания.

Существуют проблемы в трудоемкости обработки данных по результатам съемки с БПЛА, тогда возникает проблема по наполнению цифровой модели, но в программном комплексе Metashape была выполнена привязка объектов согласно полученным базам данных и выполненным пролетам, и осуществленная привязка переносится с одного облака точек на другое, если геопространственные координаты совпадают. Отсюда создана цифровая модель с наполненной базой данных на основе реального объекта, а также определена сфера применения в зависимости от структурного подразделения ОАО «РЖД».

Цифровая паспортизация обеспечит целостную картину состояния объектов на всех этапах их жизненного цикла – от строительства до вывода из эксплуатации. Это поможет повысить эффективность планирования и проведения ремонтных работ, оптимизировать распределение ресурсов, а также обеспечить более оперативное реагирование на возникающие проблемы. Кроме того, собрание объемов информации в одну базу составит достоверность данных устройства инфраструктуры, что можно будет использовать как основу для передовых методов анализа и прогнозирования. Внедрение в обработку машинных алгоритмов обучения на основе полученной библиотеки позволит использовать рациональные алгоритмы обработки информации и дальнейшего ее применения.

При разработке были предложены новые способы получения сведений о состоянии реальных объектов на основе цифровой модели и методы прогнозирования влияния различных факторов, которые значительно упрощают процессы работы с объектом и повышают точность результатов. Это означает, что технологии, разработанные в рамках проекта, могут быть применены в различных сферах, где необходимо работать с объектами в реальном мире.

Таким образом, внедрение цифровых технологий и БПЛА в железнодорожной отрас-

ли может привести к значительному улучшению процессов работы, но только при соблюдении правил и мер безопасности. Необходимо

продолжать деятельность в этом направлении, чтобы достичь максимальной эффективности и минимизировать риски.

Список литературы

1. Шевченко Д.В. Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте // Вестн. Науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2021. Т. 80. № 2. С. 91–99.
2. Тарабрин В.Ф., Юрченко Е.В., Лохач А.В. ЕК АСУИ СДМИ – цифровая платформа для предиктивного анализа и управления состоянием железнодорожной инфраструктуры // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 6. С. 25–28.
3. Быков А.А., Челябинова К.В. Использование цифрового проекта пути и электронных карт при строительстве и ремонте железнодорожного пути // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 1. № 1. С. 92–98.
4. Суслов О.А., Федорова В.И. Цифровые двойники – перспективная основа планирования технического обслуживания железнодорожного пути // Наука 1520 ВНИИЖТ: загляни за горизонт : сб. материалов I Междунар. науч.-практ. конф. Щербинка, 2021. С. 184–192.
5. Об утверждении правил по охране труда при техническом обслуживании и ремонте объектов инфраструктуры путевого комплекса ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» № 953/р от 08.04.2022 (ред. 14.03.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
6. Типовой технологический процесс № 81400065. Обследование земляного полотна и водоотводных сооружений с применением беспилотных летательных аппаратов : утв. заместителем начальника Дирекции диагностики и мониторинга инфраструктуры № ЦДМ-41/п от 19.09.2022.
7. Revealing safety risks of unmanned aerial vehicles in construction / M. Namian, M.Khalid, G. Wang et al. // Transportation research record. 2021. Vol. 2675. Iss. 11. P. 334–347. DOI 10.1177/03611981211017134.
8. Тимофеев Е.Н., Севостьянов А.А., Сокольников А.В. Создание цифровой модели железнодорожного пути с использованием беспилотных летательных аппаратов // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2024. № 1 (68). С. 73–82.
9. Давтян А.М., Дружинина Т.Я., Асалханова Т.Н. Диагностика и мониторинг железнодорожной инфраструктуры с помощью беспилотных летательных аппаратов // Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации – 2023 : материалы XVI Всерос. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов, посвящ. празднованию 100-летия отечеств. граждан. авиации. Иркутск, 2023. С. 249–254.
10. Романенко В.В., Рудковский И.В., Ародь Л.Н. Применение современных средств автоматизации для паспортизации кривых на Белорусской железной дороге // Вестн. Белорус. гос. ун-та трансп.: наука и транспорт. 2021. № 2 (43). С. 43–46.
11. Карпов И.Г., Лагерева С.Ю. Содержание рельсовой колеи по координатам // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 3. С. 7–9.
12. Карпов И.Г., Лагерева С.Ю., Асалханова Т.Н. Перспективы развития референтных сетей на железнодорожном транспорте // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 5 (89). С. 26–30.
13. Каташева А.П., Асалханова Т.Н., Осолков А.А. Сравнительный анализ планирования и фактического выполнения работ по текущему содержанию пути по Иркутск-Сортировочной дистанции пути // Молодая наука Сибири. 2020. № 2 (8). С. 73–80. URL: https://mnnv.irkgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/katashева_асалханова.pdf (дата обращения 18.09.2024).
14. Давтян А.М., Асалханова Т.Н. Использование беспилотных авиационных систем на железнодорожном транспорте // Молодая наука Сибири. 2023. № 1 (19). С. 24–32. URL: <https://ojs.irkgups.ru/index.php/mns/article/view/1035/767> (дата обращения 20.09.2024).
15. Гончаровская В.П., Гулякин Д.В. Виртуальное строительство (цифровая модель здания) // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 98-11. С. 101–104.
16. Асалханова Т.Н., Полищук С.С. Обследование скально-обвальных участков Восточно-Сибирской железной дороги с помощью беспилотных летательных аппаратов // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 3 (99). С. 46–51.
17. Тимофеев Е.Н., Ефимов Н.В., Бакулина В.Е. Применение цифровой модели железной дороги на примере службы пути // Науч.-техн. и эконом. сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2023. Т. 1. С. 431–434.
18. Automated Identification and Qualitative Characterization of Safety Concerns Reported in UAV Software Platforms / A. Di Sorbo, F. Zampetti, C.A. Visaggio et al. // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2023. Vol. 32. Iss. 3. DOI 10.1145/3564821.

References

1. Shevchenko D.V. Metodologiya postroeniya tsifrovyykh dvoynikov na zheleznodorozhnom transporte [Methodology of the digital twin construction on the railway transport]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific and Research Institute of the Railway Transport], 2021, Vol. 80, no 2, pp. 91–99.
2. Tarabrin V.F., Yurchenko E.V., Lokhach A.V. EK ASUI SDMI – tsifrovaya platforma dlya prediktivnogo analiza i upravleniya sostoyaniem zheleznodorozhnoi infrastruktury [Unified corporate automated infrastructure management system infrastructure diagnostics and monitoring system – a digital platform for predictive analysis and management of the railway infrastructure condition]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and Track Facilities], 2022, no 6, pp. 25–28.
3. Bykov A.A., Chelyadinova K.V. Ispol'zovanie tsifrovogo proekta puti i elektronnykh kart pri stroitel'stve i remonte zheleznodorozhnogo puti [Use of digital track design and electronic maps in construction and repair of railway track]. *Intereskpo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia], 2019, Vol. 1, no 1, pp. 92–98.
4. Suslov O.A., Fedorova V.I. Tsifrovyye dvoyniki – perspektivnaya osnova planirovaniya tekhnicheskogo obsluzhivaniya zheleznodorozhnogo puti [Digital twins – a promising basis for railway track maintenance planning]. *Sbornik materialov I*

Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka 1520 VNIIZhT: zaglyani za gorizont» [Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference «Science 1520 : Look beyond the horizon»]. Shcherbinka, 2021, pp. 184–192.

5. Rasporyazhenie OAO «RZhD» «Ob utverzhdenii pravil po okhrane truda pri tekhnicheskome obsluzhivanii i remonte ob'ektov infrastruktury putevogo kompleksa OAO «RZhD» № 953/r ot 08.04.2022 (red. 14.03.2023) [Order of JSC «Russian Railways» no 953/r dated April 8, 2022 (ed. March 14, 2023)].

6. Tipovoi tekhnologicheskii protsess № 81400065. Obsledovanie zemlyanogo polotna i vodootvodnykh sooruzhenii s primeneniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov : utv. zamestitelem nachal'nika Direktsii diagnostiki i monitoringa infrastruktury № TsDM-41/p ot 19.09.2022 [Standard technological process No 81400065. Inspection of the roadbed and drainage structures using unmanned aerial vehicles: approved by the Deputy head of the Directorate of Diagnostics and Monitoring of Infrastructure No TsDM-41/p dated September 19, 2022].

7. Namian M., Khalid M., Wang G., Turkan Y. Revealing safety risks of unmanned aerial vehicles in construction // Transportation research record, 2021, Vol. 2675, iss. 11, pp. 334–347. DOI 10.1177/03611981211017134.

8. Timofeev E.N., Sevost'yanov A.A., Sokol'nikov A.V. Sozdanie tsifrovoi modeli zheleznodorozhnogo puti s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Creation of a digital model of a railway track using unmanned aerial vehicles]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of Siberian State Transport University], 2024, no 1 (68), pp. 73–82.

9. Davtyan A.M., Druzhinina T.Ya., Asalkhanova T.N. Diagnostika i monitoring zheleznodorozhnoi infrastruktury s pomoshch'yu bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Diagnostics and monitoring of railway infrastructure using unmanned aerial vehicles]. *Materialy XVI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov, posvyashchennoi prazdnovaniyu 100-letiya otechestvennoi grazhdanskoj aviatsii «Aktual'nye problemy razvitiya aviatsionnoi tekhniki i metodov ee ekspluatatsii – 2023»* [Proceedings of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Postgraduates, dedicated to the celebration of the 100th anniversary of Russian civil aviation «Actual problems of development of aviation technology and methods of its operation – 2023»]. Irkutsk, 2023, pp. 249–254.

10. Romanenko V.V., Rudkovskii I.V., Arod' L.N. Primenenie sovremennykh sredstv avtomatizatsii dlya pasportizatsii krivykh na Belorusskoi zheleznoi doroge [The use of modern automation tools for curve certification on the Belarusian Railway]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport], 2021, no 2 (43), pp. 43–46.

11. Karpov I.G., Lagerev S.Yu. Soderzhanie rel'sovoi kolei po koordinatam [Rail track maintenance by coordinates]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and Track Facilities], 2022, no 3, pp. 7–9.

12. Karpov I.G., Lagerev S.Yu., Asalkhanova T.N. Perspektivy razvitiya referentsnykh setei na zheleznodorozhnom transporte [Prospects of the reference networks development on the railway transport]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of the Volga Region Transport], 2021, no 5 (89), pp. 26–30.

13. Katasheva A.P., Asalkhanova T.N., Oskolkov A.A. Sravnitel'nyi analiz planirovaniya i fakticheskogo vypolneniya rabot po tekushchemu soderzhaniyu puti po Irkutsk-Sortirovochnoi distantsii puti [Comparative analysis of planning and actual performance of works on current track maintenance at Irkutsk-Sortirovochnaya track distance]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2020, no 2 (8), pp. 73–80.

14. Davtyan A.M., Asalkhanova T.N. Ispol'zovanie bespilotnykh aviatsionnykh sistem na zheleznodorozhnom transporte [Use of unmanned aircraft systems on railway transport]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 1 (19), pp. 24–32.

15. Goncharovskaya V.P., Gulyakin D.V. Virtual'noe stroitel'stvo (tsifrovaya model' zdaniya) [Virtual construction (digital model of building)]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Tendencies of science and education development. and education], 2023, no 98-11, pp. 101–104.

16. Asalkhanova T.N., Polishchuk S.S. Obsledovanie skal'no-obval'nykh uchastkov Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi s pomoshch'yu bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Survey of the rocky-rocky sections of the East Siberian railway with the help of unmanned aerial vehicles]. *Vestnik Transporta Povolzh'ya* [Bulletin of the Volga Region Transport], 2023, no 3 (99), pp. 46–51.

17. Timofeev E.N., Efimov N.V., Bakulina V.E. Primenenie tsifrovoi modeli zheleznoi dorogi na primere sluzhby puti [Application of the digital model of the railway on the example of the p service]. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of the APR countries in the XXI century], 2023, Vol. 1, pp. 431–434.

18. Di Sorbo A., F. Zampetti, C.A. Visaggio, Di Penta M., Panichella S. Automated Identification and Qualitative Characterization of Safety Concerns Reported in UAV Software Platforms // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, 2023, Vol. 32, iss. 3. DOI: 10.1145/3564821.

Информация об авторах

Тимофеев Егор Николаевич, аспирант кафедры инженерной геодезии, инженер научно-исследовательской лаборатории диагностики дорожных одежд и земляного полотна, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, e-mail: egtini@vk.com.

Севостьянов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, e-mail: seva2233@yandex.ru.

Information about the authors

Egor N. Timofeev, Ph.D. Student of the Department of Engineering Geodesy, Engineer of Scientific Research Laboratory of Diagnostics of Roadbeds and Ground Bed, Siberian Transport University, Novosibirsk; e-mail: egtini@vk.com.

Alexander A. Sevost'yanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Track and Track Facilities, Siberian Transport University, Novosibirsk, e-mail: seva2233@yandex.ru.

Структурные особенности отрасли транспортно-логистических услуг с выделением сегментов, потребителей, конкурентов в кластере грузовых перевозок, экспедиторских и складских услуг

Н.В. Власова✉, Е.Ю. Царегородцева

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

✉natalya.vlasova.76@list.ru

Резюме

В настоящее время в условиях существенных ограничений транспортировки грузов перед холдингом ОАО «РЖД» с целью выполнения государственного заказа ставится ряд государственных и социальных задач. Стратегическим приоритетом транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД» является совершенствование 3PL–4PL-услуг, развитие сквозных транспортно-логистических услуг «от двери до двери», предоставление экономически обоснованных продуктов транспортно-логистического бизнеса в формате «единого окна», интеграция глобальных цепей поставок, создание ИТ-платформы и компетенций для подготовки к выходу продуктов в спектр 5PL-услуг. В бизнес-единицах холдинга «РЖД» планируется развитие интегрированных сервисов для согласованного взаимодействия с клиентами и контрагентами. Применение интегрированных решений для управления транспортной и складской логистикой является одним из основных элементов логистического аутсорсинга. К 2030 г. целевой портфель услуг ОАО «РЖД» будет включать комплексные услуги по управлению внутренней и внешней логистикой предприятий (3PL), а также по управлению цепочкой поставок в рамках услуг 4PL, услуги для промышленных предприятий с организацией доставки грузов на первой и последней миле. В статье авторами выполнен анализ транспортно-логистических услуг в сегменте потребителей и конкурентов, выявлены сильные и слабые стороны, составлена схема логистического аутсорсинга (схема рынка) 1PL, 2PL, 3PL, 4PL. В России уровень развития сегмента 3PL-услуг потенциально может стать наиболее быстрорастущим в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Повышение прозрачности и надежности перевозок, усиление контроля за сторонними транспортно-логистическими компаниями позволят увеличить долю сегмента 3PL-услуг. Таким образом, в целом в отрасли транспортно-логистических услуг необходимы существенные структурные изменения в части повышения качества регуляторной среды, финансирования инфраструктуры, особенно в железнодорожном сегменте (в основном инфраструктура финансируется лишь со стороны государства, в то время как у частных инвесторов наблюдается слабая заинтересованность в соответствующих проектах), внедрения новых решений и технологий, что подтверждается тем, что большая часть ценности рынка формируется не за счет комплексных логистических решений, а грузоперевозками одним видом транспорта.

Ключевые слова

транспортно-логистические услуги, транспортно-экспедиторские услуги, потребители, грузоотправители, грузовые перевозки, провайдеры в логистике 3PL и 4PL, логистические провайдеры, складские услуги

Для цитирования

Власова Н.В. Структурные особенности отрасли транспортно-логистических услуг с выделением сегментов, потребителей, конкурентов в кластере грузовых перевозок, экспедиторских и складских услуг / Н.В. Власова, Е.Ю. Царегородцева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4 (84). С. 32–41. DOI 10.26731/1813-9108.2024.4(84).32-41.

Информация о статье

поступила в редакцию: 19.11.2024 г.; поступила после рецензирования: 16.12.2024 г.; принята к публикации: 17.12.2024 г.

Structural features of the transport and logistics services industry with identification of segments, consumers, competitors in the freight transportation cluster, forwarding and warehousing services

N.V. Vlasova✉, E.Yu. Tsaregorodtseva

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉natalya.vlasova.76@list.ru

Abstract

Currently, under conditions of significant restrictions on cargo transportation, the Russian Railways holding company is faced with a number of state and social tasks in order to fulfill the state order. The strategic priority of the Transport and Logistics Business Holding «Russian Railways» is the improvement of 3-4PL services, the development of end-to-end transport and logistics services «from door to door», the provision of economically sound transport and logistics business products in the «single window» format, the

integration of global supply chains, creating an IT bridgehead and competencies to prepare for the entry of products into the range of 5PL services. The business units of the Russian Railways holding plan to develop integrated services for coordinated interaction with clients and counterparties. The use of integrated solutions for managing transport and warehouse logistics is one of the main elements of logistics outsourcing. By 2030, the target portfolio of services of JSC «Russian Railways» will include comprehensive services for managing internal and external logistics of enterprises (3PL), as well as supply chain management within the framework of 4PL services, services for industrial enterprises with the organization of cargo delivery in the first and last mile. In the scientific article, the author analyzed transport and logistics services in the segment of consumers and competitors, identified strengths and weaknesses, and compiled a logistics outsourcing scheme (market diagram) 1 PL, 2 PL, 3 PL, 4 PL. In Russia, the level of development of the 3PL services segment has the potential to become the fastest growing in the medium and long term. Increasing the transparency and reliability of transportation, strengthening the level of control over third-party transport and logistics companies will increase the share of the 3PL services segment. Thus, in general, the transport and logistics services industry requires significant structural changes in terms of improving the quality of the regulatory environment, infrastructure financing, especially in the railway segment (infrastructure is mainly financed only by the state, while private investors have weak interest in infrastructure projects), implementation of new solutions and technologies, which is confirmed by the fact that most of the market value is formed not through integrated logistics solutions, but through cargo transportation by one mode of transport.

Keywords

transport and logistics services, freight forwarding services, consumers, shippers, freight transportation, 3PL and 4PL logistics providers, logistics providers, warehouse services

For citation

Vlasova N.V., Tsaregorodtseva E.Yu. Strukturnye osobennosti otrasli transportno-logisticheskikh uslug s vydeleniem segmentov, potrebiteli, konkurentov v klasterе gruzovykh perevozk, ekspeditsionnykh i skladnykh uslug [Structural features of the transport and logistics services industry with identification of segments, consumers, competitors in the freight transportation cluster, forwarding and warehousing services]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, No. 4(84), pp. 32–41. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.4(84).32-41.

Article info

Received: November 19, 2024; Revised: December 16, 2024; Accepted: December 17, 2024.

Введение

Укрупненно отрасль транспортно-логистических услуг (ТЛУ) можно разделить на сегменты внутренних и международных перевозок с выделением крупных и более мелких грузоотправителей, границы которых определены объемом рынка в денежном выражении и количеством участников. Крупные грузоотправители в основном представлены ресурсными компаниями и промышленными холдингами, имеющими собственные логистические подразделения и трейдеров. Средние и мелкие грузоотправители это преимущественно строительные компании, дистрибьютерские центры, отправители контейнеризированных грузов, они составляют основной спрос на 3PL-услуги (комплексная логистика – выполнение логистическим провайдером комплекса внешних логистических операций, связанных с транспортированием и хранением груза) и 4PL-услуги (интегрированная логистика – выполнение логистическим провайдером всех внешних логистических операций, связанных с транспортированием и хранением груза, а также управление внутренними логистическими процессами грузовладельца). Сегодня передача логистики на аутсорсинг имеет массу преиму-

ществ и существенное значение. Практика показывает, что при больших объемах производства компаниям выгодно заключать договор на логистическое обслуживание со специализированным внешним оператором. Сторонники применения аутсорсинга, имея общую позицию по этому вопросу, расходятся лишь в определении количества поставщиков логистических услуг. Например, в рамках концепции Lean Production рекомендуется иметь одного поставщика (к тому же он рассматривается как партнер по бизнесу), другие предполагают несколько поставщиков, что исключает зависимость от единственного поставщика, позволяет предотвратить сбои в оказании логистических услуг, улучшает качество обслуживания (через конкуренцию между операторами). Данный инструмент обеспечения предпринимательской деятельности требует предварительного тщательного анализа, особенно в тех случаях, когда цель состоит не в организации разовых перевозок, а в подборе оператора, который сумеет организовать для заказчика полноценное логистическое обслуживание с минимальными издержками и максимально высоким качеством. Сегодня компании, передающие логистику на аутсорсинг, выбирают из 2PL, 3PL, 4PL наибо-

лее подходящий способ и организуют логистическое обеспечение с использованием соответствующих сил и средств [1–3] (рис. 1).

Целью настоящей статьи является выявление крупных и мелких грузоотправителей в сегменте ТЛУ, предоставляемых холдингом «РЖД».

Транспортно-логистические услуги в сегменте потребителей и конкурентов

В отрасли ТЛУ совокупная выручка компаний более чем на 80 % представлена услугами грузовых перевозок; на 10 % – услугами экспедирования; на 5 % – услугами по складированию; на 1 % – управленческой логистикой.

На долю 2PL-логистики (традиционная логистика – выполнение логистическим провайдером части внешних логистических операций, связанных с транспортированием и хранением груза с привлечением контрагентов при необходимости) с участием сторонних компаний на определенном этапе транспортно-логистического процесса приходится чуть более 30 % российской отрасли ТЛУ, на долю 3PL-логистики (логистический аутсорсинг) – порядка 7 %.

Для оценки структуры конкуренции в отрасли ТЛУ наибольшее влияние имеют покупатели, в особенности в секторе 3PL- и 4PL-услуг, тогда как риск новых крупных конкурен-

тов невелик в силу высокой степени дифференциации ТЛУ и высоких входных барьеров.

На рынке ТЛУ осуществляют деятельность порядка 4 000 участников. Вместе с тем рынок является высокконцентрированным: значение индекса концентрации трех крупнейших компаний на рынке (CR3) – 63,4 %. При значительной концентрации участников рынка слияние или поглощение одной либо нескольких компаний не приведет к монополизации сегмента.

В дальнейшем, с уходом зарубежных компаний, ожидается, что концентрация на рынке ТЛУ усилится.

На данный момент основными игроками в периметре сферы ТЛУ являются ОАО «РЖД» с долей 55,3 %, ПАО «ТрансКонтейнер» (4,1 %), ГК «Fesco» (3,9 %), ГК «Волга-Днепр» (3,6 %), ГК «Globaltrans» (1,9 %) (рис. 2). При этом ПАО «ТрансКонтейнер» и ГК «Fesco» специализируются на мультимодальных перевозках [4–6].

Грузовые перевозки и экспедиторские услуги

Сегмент 2PL-услуг характеризуется стабильностью спроса, высокой стандартизацией технологий и постоянством основных грузоотправителей и потребителей. Транспортно-логистический бизнес (ТЛБ) холдинга «РЖД» в

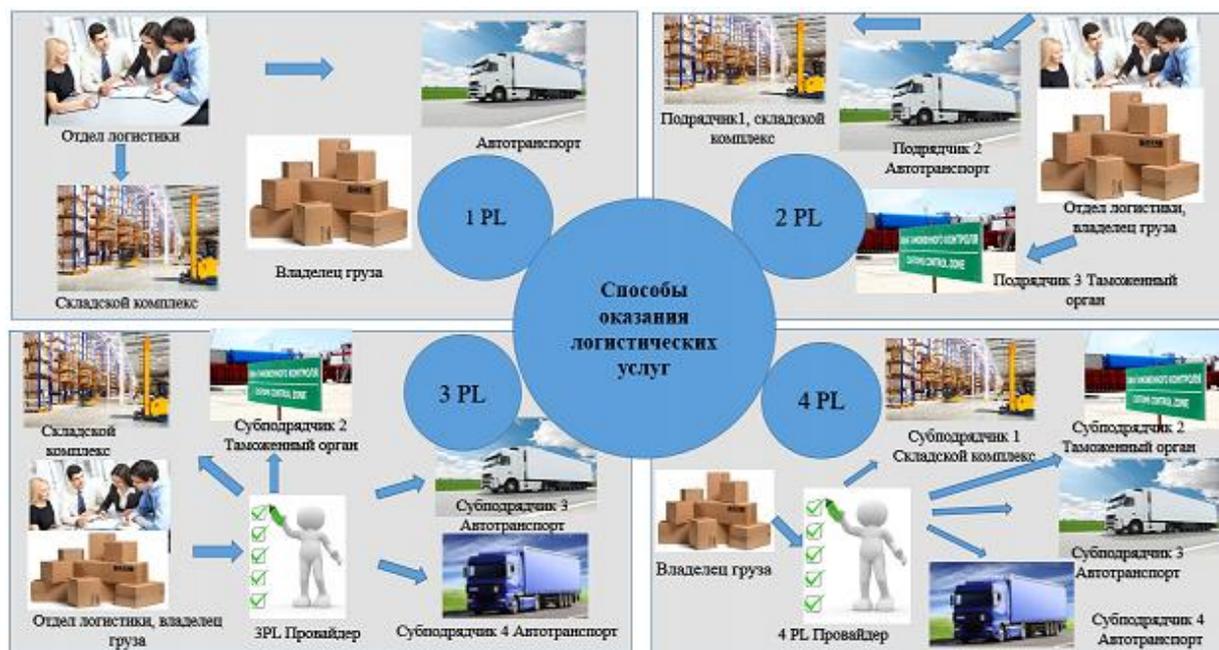


Рис. 1. Схема логистического аутсорсинга 1PL, 2PL, 3PL, 4PL (схема рынка)

Fig. 1. Logistics outsourcing scheme 1PL, 2PL, 3PL, 4PL (market diagram)

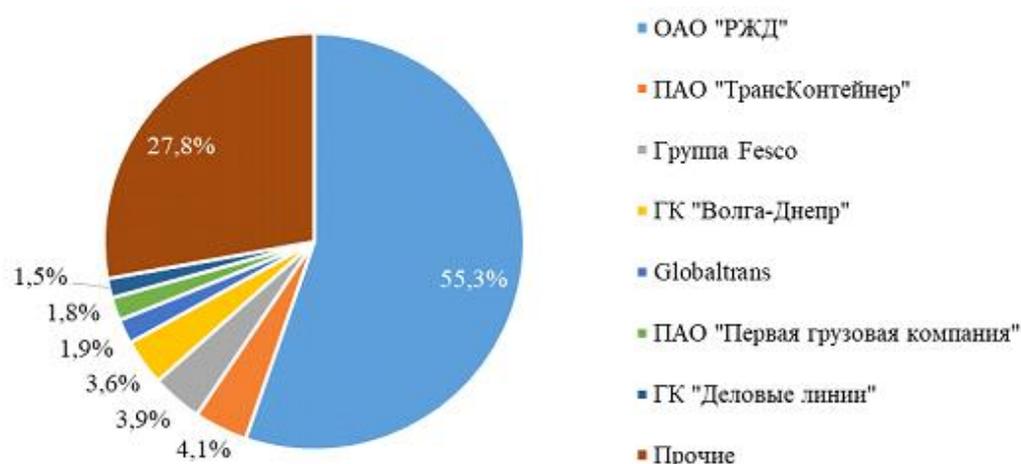


Рис. 2. Доля основных игроков российской отрасли транспортно-логистических услуг (по выручке)
Fig. 2. Share of the main players in the Russian industry transport and logistics services (by revenue)

данном сегменте представлен деятельностью Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом (ЦМ) и АО Федеральной грузовой компанией (АО «ФГК»). Основное свойство предлагаемых перевозочных услуг и погрузо-разгрузочных работ (ПРР), обеспечивающее конкурентное преимущество холдинга «РЖД» – наличие магистральной железнодорожной инфраструктуры, интегрированной с объектами для осуществления ПРР и тяговым подвижным составом, что формирует полный цикл оказания услуги 2PL. Также осуществляется индивидуальный подход для каждого клиента, вплоть до индивидуальных методов и технических устройств для каждого потребителя и вида груза. Так, для выгрузки щебня, угля, песка и других грузов из вагонов используются специальные «повышенные» пути, для выгрузки тракторов – эстакады, для выгрузки металла – специализированные захваты. Для обеспечения высокого качества услуг в данном сегменте холдинг «РЖД» обладает производственными площадками вблизи путей необщего пользования и специализированным персоналом. Снижение операционных затрат, надежность партнерских отношений с клиентами, дифференциация за счет технических, технологических и человеческих ресурсов составляют ключевые факторы эффективности 2PL-услуг.

Основными конкурентами в данном сегменте являются логистические провайдеры, обладающие собственными ресурсами для организации перевозок и погрузочно-разгрузочных работ, такие как ТК Энергия, АО «ПГК», АО

«Нефтетранссервис», АО «Уголь-Транс», ГК «Globaltrans», «Трансойл».

Сегмент комплексных логистических услуг 3PL/4PL предусматривает внутренние и международные перевозки. Существует потенциал заключения договоров с автомобильными перевозчиками, российскими морскими грузовыми линиями (Усть-Луга – Калининград, Санкт-Петербург – Калининград и т.д.). Реализуется проект «ЦМ-Экспедитор», предусматривающий минимизацию участия клиентов в процессах, связанных с перевозкой груза железнодорожным транспортом, и сокращение рисков во время его доставки путем создания оптимальной логистической схемы. Клиентам предоставляется полный пакет услуг, включая доставку «от двери до двери». При этом подсегмент комплексных логистических услуг на внутреннем рынке характеризуется большим количеством конкурентов, таких как «Евросиб», ИТЕКО, «ЖелДорЭкспедиция» и прочие транспортные компании [3, 7–9].

Перечень услуг определяется условиями поставок. При включении в условия Delivered, Duty Paid (DDP) груз должен быть доставлен в указанное место в стране покупателя, риски и расходы по доставке груза относятся к сфере ответственности продавца.

Основные риски организации мультимодальных международных перевозок составляют волатильность фрахта, тарифы на контейнерные перевозки. В 2023 г. падение мировых тарифов на контейнерные перевозки не отразилось на российском рынке из-за сокращения предложе-

ния вследствие ухода пятерки крупнейших мировых контейнерных линий. При этом спрос остается довольно высоким, что обуславливает волатильность тарифных ставок.

В периметре холдинга «РЖД» международные экспедиторские услуги преимущественно оказывают АО «РЖД Логистика», АО «Бизнес Актив», АО «ОТЛК ЕРА». Крупнейшими конкурентами в подсегменте являются ГК «Fesco», ПАО «Трансконтейнер», ГК «Деловые линии», ГК «Дело», ООО «Модуль».

В 2023 г. в общем объеме рынка транспортно-экспедиторских услуг доля сегмента экспедирования составила 6,4 % (около 265 млрд руб.), годом ранее – 6 %. Значительная доля транспортно-экспедиторских услуг объясняется географическим расположением рынка в широтном направлении, что в свою очередь обуславливает большие площади покрытия и протяженности производственных и торговых связей, а также сырьевой ориентированностью экономики (зачастую локация производства находится в большой удаленности от локаций потребления).

В 2023 г. в среднем валовая рентабельность на рынке составляет порядка 21 %, а рентабельность продаж – 6 %. Так, АО «ОТЛК ЕРА» имеет показатели, приближенные к среднерыночным, – 14 и 12 % соответственно (рис. 3). Показатели АО «РЖД Логистика» составляют 4 и 2 % соответственно [10–12].

Сохранение традиционной для отрасли ТЛУ в России модели управления перевозками (наличие активов для перевозок собственной продукции) замедляет развитие сегмента. Новые промышленные предприятия преимущественно перейдут к модели задействования аутсорсинга логистики.

Граница сегмента 3PL-услуг увеличилась на 21 % – с 235 млрд руб. до 292 млрд руб. в период 2021–2023 гг. (рис. 4). В 2023 г. показатель составил 285 млрд руб. (–2,5 %), что в среднем соответствует 7 % от совокупного объема транспортно-логистического рынка (аналогичный среднемировой показатель достигает 20 %). [4, 13–15].

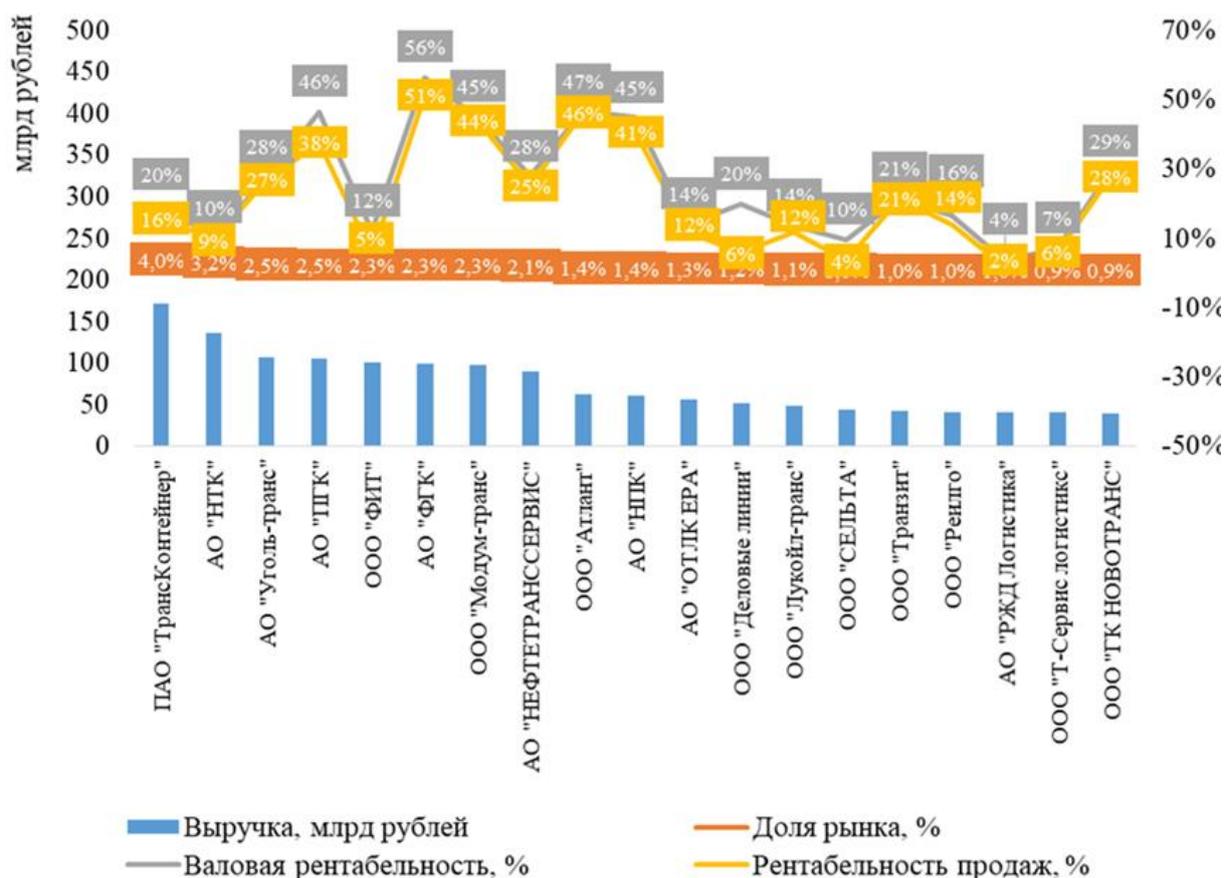


Рис. 3. Крупнейшие игроки рынка транспортно-экспедиторских услуг в 2023 г.

Fig. 3. The largest players in the market of transport and forwarding services in 2023

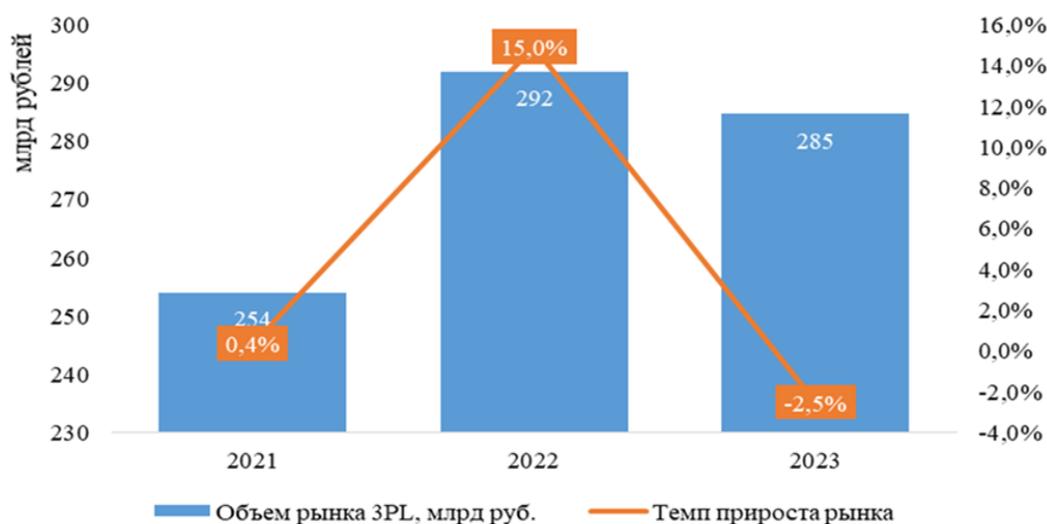


Рис. 4. Динамика объема российской рынка 3PL-услуг
Fig. 4. Dynamics of the Russian 3PL services market volume

До 2023 г. комплексные логистические услуги в России оказывали порядка 100–120 компаний, из которых до 50 % были российскими. Относительно небольшое количество игроков в данном сегменте связано со сложившимся подходом к логистике грузов крупнейшими компаниями, когда транспортно-логистические операции выполняются собственными силами или через экзитивные предприятия. При этом в случаях делегирования производителями функций транспортировки и логистики сторонним компаниям первым важно сохранение контроля за цепочками поставок.

На данный момент на долю пяти крупнейших компаний, осуществляющих функции 3PL-операторов, приходится порядка 93 % от

общего объема рынка, из которых три (ООО «ФИТ» (Fesco), ЗАО «ФМ Ложистик Восток», ГК «Деловые линии») находятся за периметрами холдинга «РЖД» (рис. 5). С учетом развития рынка электронной коммерции компании в сегменте 3PL-логистики нацелены на увеличение своей доли для повышения средней маржинальности бизнеса [4, 16–18].

Для обеспечения устойчивого положения в сегменте 3PL/4PL логистики и роста конкурентоспособности бизнес-единицам холдинга «РЖД» необходимо обеспечить возможность фрахтования слотов судов, что позволит стабилизировать международные контейнерные перевозки, образовать стратегические кооперации, нацеленные на обеспечение гарантированного

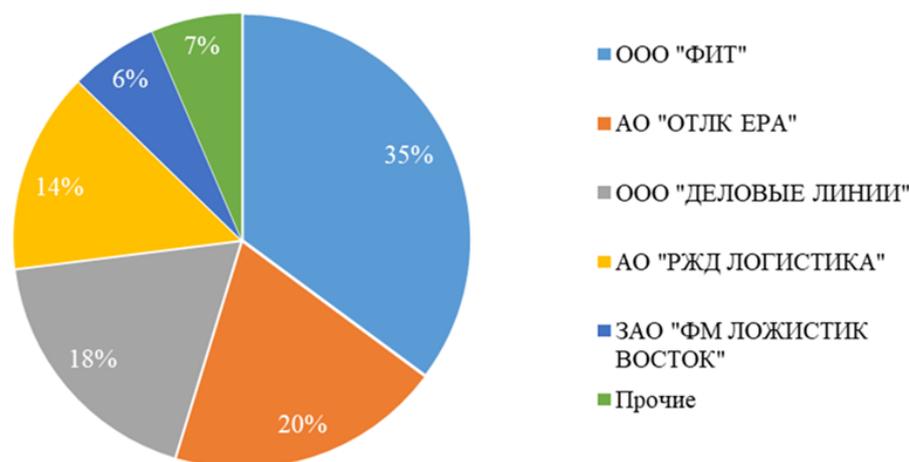


Рис. 5. Доля основных игроков российского рынка 3PL-услуг в 2023 г.
Fig. 5. Share of the main players in the Russian 3PL services market in 2023

объема международных перевозок бизнес-единицами холдинга «РЖД».

В августе 2023 г. АО «РЖД Бизнес Актив» и логистический оператор ООО «Октет карго» (проектная компания АРПИ) запустили новый мультимодальный контейнерный сервис из Благовещенска, ориентированный на обеспечение грузооборота между Китаем и Россией через новый таможенный переход Кани-Курган в Амурской области.

По условиям соглашения, подписанного в сентябре со сроком до 2025 г., АО «РЖД Бизнес Актив» обеспечивает железнодорожные перевозки по России, тогда как партнер – перевозки по маршруту Благовещенск – Хэйхэ с сопутствующими услугами хранения и таможенного оформления.

В сентябре 2023 г. АО «РЖД Бизнес Актив» и АО «Терминал Астафьева» заключили меморандум о сотрудничестве по развитию контейнерных перевозок, который предусматривает взаимодействие при организации мультимодальных сервисов с использованием инфраструктуры терминала в бухте Находка, а в октябре открыли новый сервис перевозок из Китая в Россию [20].

Складские услуги

В сегменте складских услуг в 2021–2023 гг. наблюдается рост выручки на фоне увеличения складских площадей: объем рынка со 128 млрд руб. в 2021 г. вырос до 171 млрд руб. в 2023 г. (рис. 6).

Наиболее высокий рост рынок продемонстрировал в 2022 г., когда объем сегмента вырос на 28,4 % в сравнении с пандемийным 2021 г. Тогда основными драйверами выступали

компания онлайн-торговли под влиянием растущего количества интернет-заказов, обуславливающего активное расширение сферы электронной коммерции.

Данные факторы стимулировали активное наращивание складских площадей в целях своевременного осуществления доставки грузов к конечному потребителю – переход центральных складов к хранению товаров ближе к потребителю [3, 19].

Основными факторами роста объема рынка на фоне ухода зарубежных логистических компаний и сокращения объемов перевозки в 2023 г. стали:

- ограниченное предложение новых складских помещений;
- сохранение действующих контрактов с покидающими отечественный рынок операторами складских комплексов;
- усложнение логистических цепочек, что привело к наращиванию запасов производителями и продавцами.

Общий объем предложения складских площадей в Российской Федерации в 2023 г. достиг 42,2 млн м², из которых 55 % расположились в Московском регионе, 12 % – в Екатеринбурге и еще 11 % – в Санкт-Петербурге (включая Ленинградскую область).

Уровень вакантности складских площадей в 2023 г. достиг рекордно низких 1,9 %, что обусловлено замедлением роста ввода новых площадей, данный уровень близок к дефицитному состоянию.

Основную долю новых площадей на рынке складских услуг формируют объекты, возводимые или модернизируемые с учетом конкретных целей и задач заказчиков, требова-

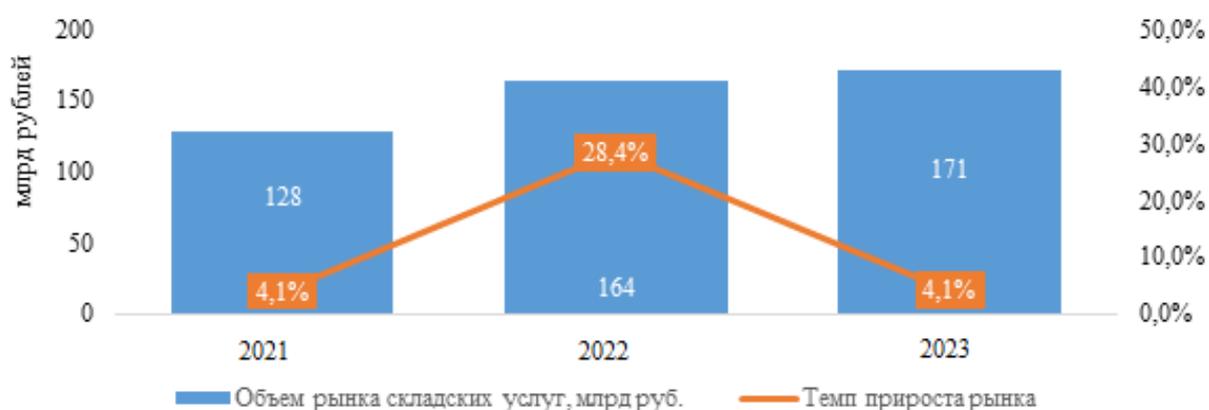


Рис. 6. Динамика объема российского рынка складских услуг
Fig. 6. Dynamics of the volume of the Russian warehouse services market

ний и особенностей ТЛБ (формат «build-to-suit»). Доля сданных площадей в 2023 г. составила порядка 45 %, еще 23 % включают склады, возведенные собственниками бизнеса для своих нужд, а оставшаяся доля пришлась на «спекулятивную» сдачу, т.е. для передачи площадей в субаренду [4, 21, 22].

Заключение

В новых экономических условиях необходимо ориентироваться на два главных требования потребителей: справедливый тариф и полнота (достаточность) логистической услуги. Обеспечить реализацию данных условий возможно за счет оптимизации издержек (экономика на масштабе), стратегических партнерств, обеспечения надежности и постоянства работы, высокой скорости предоставления услуг, комплексной «бесшовной» логистики, увеличения направлений перевозок, соблюдения высоких требований к административным и стратегическим навыкам. В России уровень развития сегмента 3PL-услуг потенциально может стать наиболее быстрорастущим в среднесрочной и

долгосрочной перспективе. Повышение прозрачности и надежности перевозок, усиление контроля за сторонними транспортно-логистическими компаниями позволят повысить долю сегмента 3PL-услуг.

При этом на рынке наблюдается недостаток складской инфраструктуры, позволяющей обрабатывать широкую номенклатуру грузов, так как в основном пользователи складских пространств организуют площади под свои узкоспециализированные нужды. Кроме того, высокая стоимость строительства железнодорожных подъездных путей также обуславливает дефицит складов, имеющих примыкание к железнодорожной инфраструктуре.

Диверсификация направлений перевозок способствует строительству новых транспортно-логистических центров и повышению спроса на существующие на альтернативных маршрутах. Потенциал участия холдинга «РЖД» может быть реализован за счет участия в развитии сети транспортно-логистических центров для оптимизации перевозок контейнерных грузов.

Список литературы

1. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <http://www.rzd.ru> (дата обращения 12.11.2024).
2. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
3. Сценарии развития Восточной Сибири и российского Дальнего Востока в контексте политической и экономической динамики Азиатско-Тихоокеанского региона до 2030 года : аналит. доклад / Л.А. Аносова, А.Г. Коржубаев, А.Н. Панов и др. М. : Едиториал УРСС, 2011. 120 с. URL : <http://econom.nsc.ru/ieie/Izdan/trudi/korzubaev/doklad.pdf> (дата обращения 13.11.2024).
4. Рынок логистического аутсорсинга: итоги 2022 г., оценка 2023 г., прогноз 2026 г. // М.А. Research : сайт. URL : <http://ma-research.ru/research/item/395-gynok-logisticheskogo-aoutsorsinga-itogi-2022-g-otsenka-2023-g-i-prognoz-do-2026-g.html> (дата обращения 01.11.2024).
5. Власова Н.В., Оленцевич В.А. Декомпозиция основных бизнес-процессов и зоны формирования рисков железнодорожной транспортной системы в сфере грузовых перевозок // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 4 (63). С. 44–52.
6. Цыганов Н.А. Использование транспортно-логистических услуг 3pl-провайдера как фактор повышения устойчивости предприятия // Ключевые позиции и точки развития экономики и промышленности: теория и практика : сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. Липецк, 2023. С. 697–699.
7. Капский П.Д., Ивуть Р.Б. Сравнительный анализ потенциала экспедиторов и логистических операторов на рынке транспортно-логистических услуг республики Беларусь // Инновационный транспорт. 2024. № 2 (52). С. 34–36.
8. Власова Н.В., Оленцевич В.А. Совершенствование процессов транспортно-логистического бизнес-блока по реализации проекта предоставления комплекса услуг // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Чита, 2022. Т. 1. С. 262–270.
9. Транспорт // Федеральная служба государственной статистики : сайт. URL : <http://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения 01.11.2024).
10. Департамент экономической конъюнктуры и стратегического развития (ЦЭКР) // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <http://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=203> (дата обращения 01.11.2024).
11. Ефимова Е.Н., Бородина В.А. Экономические аспекты взаимодействия транспортно-логистических центров и перевозчика при реализации контейнерных перевозок // Экономика железных дорог. 2022. № 9. С. 35–42.
12. Власова Н.В. Унифицированные требования к местам общего пользования // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2022. № 9. С. 159–160.
13. Трещева А.А., Волков А.А. Формирование транспортно-логистических центров и их влияние на производительность труда Самарской области // Экономика и предпринимательство. 2023. № 10 (159). С. 680–683.
14. Степанян Т.М. Проблемы совершенствования бизнес-процессов при организации транспортно-логистических

услуг // Логистические возможности компаний в современных условиях : сб. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. М., 2019. С. 29–33.

15. Евдокимова А.С., Кучина О.В. К надежности выбора аутсорсинговой компании на рынке транспортно-логистических услуг // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Экономика. 2022. № 4. С. 130–136.

16. Малецкая М.Б., Холмовский С.Г. Рынок транспортно-логистических услуг и параметры качества транспортного обслуживания // Baikal Research Journal. 2023. Т. 14. № 3. С. 992–1002.

17. Шпак А.С. Оценка конкурентной позиции транспортно-логистической компании на рынке транспортно-экспедиторских услуг // Право и экономическое развитие: актуальные вопросы. Чебоксары, 2024. С. 67–81.

18. Константинова А.С., Мельников А.Р. Стратегия и тактика оператора смешанной перевозки на рынке транспортно-экспедиторских услуг // Молодежь. Наука. Инновации. 2023. Т. 1. С. 443–445.

19. Истратов А.А. Роль территориальных логистических центров в стимулировании экономического развития региона // Экономика и управление в России: региональный опыт, проблемы, перспективы : сб. науч. тр. II Всерос. науч.-практ. конф. Тула, 2022. С. 18–21.

20. Смирнов Д.С., Сакс Н.В. Инновации в области транспортно-логистических услуг // Мобильность будущего: проблемы, решения, инновации : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2023. С. 174–180.

21. Кривошекова В.А., Левин А.В., Власова Н.В. Перспективы дальнейшего развития отрасли грузоперевозок железнодорожным транспортом в России // Цифровая экономика: перспективы развития и совершенствования : сб. науч. ст. III Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2022. С. 188–193.

22. Ефименко Д.Д., Большаков Р.С. Особенности внедрения логистических технологий 3PL // Молодая наука Сибири. 2021. № 3 (13). С. 90–95. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/263/190> (дата обращения 10.11.2024).

References

1. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed November 12, 2024).

2. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»].

3. Anosova L.A., Korzhubaev A.G., Panov A.N., Vikhanskii O.S., Potapov V.Ya., Ostrovskii A.V., Renzin O.M., Zaverskii S.M., Kononova V.Yu., Filimonova I.V., Eder L.V., Bakhturov A.S., Bezryadin M.V., Kartashov S.V., Mishenin M.V., Nevedeev A.V., Plekhanov D.A., Rasputin M.V., Saunin O.V., Sergeev A.S., Stollyar V.A., Yudin D.V. et al. Stsenarii razvitiya Vostochnoi Sibiri i rossiiskogo Dal'nego Vostoka v kontekste politicheskoi i ekonomicheskoi dinamiki Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona do 2030 goda : analiticheskii doklad [Scenarios for the development of Eastern Siberia and the Russian Far East in the context of the political and economic dynamics of the Asia-Pacific region until 2030 : an analytical report]. Moscow: Unitorial URSS Publ., 2011. 120 p. Available at: <http://econom.nsc.ru/ieie/Izdan/trudi/korjubaev/doklad.pdf> (Accessed November 13, 2024).

4. Rynok logisticheskogo outsorsinga: itogi 2022 g., otsenka 2023 g., prognoz 2026 g. (Elektronnyi resurs) [Logistics outsourcing market: results 2022, assessment 2023, forecast 2026 (Electronic resource)]. Available at: <http://ma-research.ru/research/item/395-rynok-logisticheskogo-outsorsinga-itogi-2022-g-otsenka-2023-g-i-prognoz-do-2026-g.html> (Accessed November 1, 2024).

5. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Dekompozitsiya osnovnykh biznes-protsessov i zony formirovaniya riskov zheleznodorozhnoi transportnoi sistemy v sfere gruzovykh perevozok [Decomposition of the main business processes and the risk formation zone of the railway transport system in the field of freight transportation]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2022, no 4 (63), pp. 44–52.

6. Tsyganov N.A. Ispol'zovanie transportno-logisticheskikh uslug 3pl-provaidera kak faktor povysheniya ustoichivosti predpriyatiya [The use of transport and logistics services of a 3pl provider as a factor in increasing the sustainability of an enterprise]. *Sbornik materialov III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Klyuchevye pozitsii i tochki razvitiya ekonomiki i promyshlennosti: teoriya i praktika»* [Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference «Key positions and points of development of the economy and industry: theory and practice»]. Lipetsk, 2023, pp. 697–699.

7. Kapskii P.D., Ivut' R.B. Sravnitel'nyi analiz potentsiala ekspeditorov i logisticheskikh operatorov na rynke transportno-logisticheskikh uslug respubliky Belarus' [Comparative analysis of the potential of freight forwarders and logistics operators in the market of transport and logistics services of the Republic of Belarus]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2024, no 2 (52), pp. 34–36.

8. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Sovershenstvovanie protsessov transportno-logisticheskogo biznes-bloka po realizatsii proekta predostavleniya kompleksa uslug [Improving the processes of the transport and logistics business block for the implementation of a project for providing a range of services]. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem) «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation) «Education – Science – Production»]. Chita, 2022, Vol. 1, pp. 262–270.

9. Transport (Elektronnyi resurs) [Transport (Electronic Resource)]. Available at: <http://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (Accessed November 1, 2024).

10. Departament ekonomicheskoi kon'yunktury i strategicheskogo razvitiya (Elektronnyi resurs) [Department of economic conditions and strategic development (Electronic resource)]. Available at: <http://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=203> (Accessed November 1, 2024).

11. Efimova E.N., Borodina V.A. Ekonomicheskie aspekty vzaimodeistviya transportno-logisticheskikh tsentrov i perevozchika pri realizatsii konteynernykh perevozok [Economic aspects of interaction between transport and logistics centers and the carrier in the implementation of container transportation]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economics of Railways], 2022, no 9, pp. 35–42.

12. Vlasova N.V. Unifitsirovannyye trebovaniya k mestam obshchego pol'zovaniya [Unified requirements for public places]. *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technical progress], 2022, no 9, pp. 159–160.

13. Trescheva A.A., Volkov A.A. Formirovaniye transportno-logisticheskikh tsentrov i ikh vliyaniye na proizvoditel'nost' truda Samarskoi oblasti [Formation of transport and logistics centers and their impact on labor productivity in the Samara region]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and Entrepreneurship], 2023, no 10 (159), pp. 680–683.

14. Stepanyan T.M. Problemy sovershenstvovaniya biznes-protsessov pri organizatsii transportno-logisticheskikh uslug [Problems of improving business processes when organizing transport and logistics services]. *Sbornik statei po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Logisticheskie vozmozhnosti kompanii v sovremennykh usloviyakh»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Logistics capabilities of companies in modern conditions»]. Moscow, 2019, pp. 29–33.

15. Evdokimova A.S., Kuchina O.V. K nadezhnosti vybora outsorsingovoi kompanii na rynke transportno-logisticheskikh uslug [On the reliability of choosing an outsourcing company in the market of transport and logistics services]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Economics], 2022, no 4, pp. 130–136.

16. Maletskaya M.B., Kholmovskii S.G. Rynok transportno-logisticheskikh uslug i parametry kachestva transportnogo ob-sluzhivaniya [Market of transport and logistics services and parameters of quality of transport services]. *Baikal Research Journal*, 2023, Vol. 14, no 3, pp. 992–1002.

17. Shpak A.S. Otsenka konkurentnoi pozitsii transportno-logisticheskoi kompanii na rynke transportno-ekspeditorskikh uslug [Assessing the competitive position of a transport and logistics company in the market of transport and forwarding services]. *Monografiya «Pravo i ekonomicheskoe razvitie: aktual'nye voprosy»* [Monograph «Law and economic development»]. Cheboksary, 2024, pp. 67–81.

18. Konstantinova A.S., Mel'nikov A.R. Strategiya i taktika operatora smeshannoi perevozki na rynke transportno-ekspeditorskikh uslug [Strategy and tactics of a multimodal transportation operator in the market of transport and forwarding services]. *Molodezh'. Nauka. Innovatsii* [Youth. Science. Innovation], 2023, Vol. 1, pp. 443–445.

19. Istratov A.A. Rol' territorial'nykh logisticheskikh tsentrov v stimulirovaniy ekonomicheskogo razvitiya regiona [The role of territorial logistics centers in stimulating the economic development of the region]. *Sbornik nauchnykh trudov II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Ekonomika i upravlenie v Rossii: regional'nyi opyt, problemy, perspektivy»* [Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference «Economics and management in Russia: regional experience, problems, prospects»]. Tula, 2022, pp. 18–21.

20. Smirnov D.S., Saks N.V. Innovatsii v oblasti transportno-logisticheskikh uslug [Innovations in the field of transport and logistics services]. *Sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Mobil'nost' budushchego: problemy, resheniya, innovatsii»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Mobility of the future: problems, solutions, innovations»]. Saint Petersburg, 2023, pp. 174–180.

21. Krivoshchekova V.A., Levin A.V., Vlasova N.V. Perspektivy dal'neishhego razvitiya otrasli gruzoperevozok zheleznodorozhnym transportom v Rossii [Prospects for further development of the rail freight transportation industry in Russia]. *Sbornik nauchnykh statei III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tsifrovaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya»* [Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference «Digital economy: prospects for development and improvement»]. Kursk, 2022, pp. 188–193.

22. Efimenko D.D., Bol'shakov R.S. Osobennosti vnedreniya logisticheskikh tekhnologii 3PL [Features of the implementation of 3PL logistics technologies]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no 3 (13), pp. 90–95.

Информация об авторах

Власова Наталья Васильевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: natalya.vlasova.76@list.ru.

Царегородцева Елена Юрьевна, кандидат экономических наук, доцент кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: elenapopova86@mail.ru.

Information about the authors

Natal'ya V. Vlasova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: natalya.vlasova.76@list.ru.

Elena Yu. Tsaregorodtseva, Ph.D. in Economic Science, Associate Professor of the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: elenapopova86@mail.ru.

Оптимизация режимов работы системы тягового электроснабжения на участке обхода тоннеля

Е.Ю. Пузина✉

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

✉lena-rus05@mail.ru

Резюме

В перспективе на 2030 г. планируется существенное увеличение грузооборота по Восточному полигону и, в частности, по Байкало-Амурской магистрали. Поскольку эта дорога имеет достаточно сложный профиль пути с подъемами, достигающими 16–17 %, и множеством тоннелей в горных массивах между станциями, на отдельных ее участках возникает проблема ограничения пропускной способности системы тягового электроснабжения при пропуске тяжеловесных поездов. Для организации бесперебойного движения поездов по участкам данной дороги в случае вывода в ремонт имеющихся, особенно протяженных, тоннелей, а также с учетом роста количества и масс поездов в будущем, актуальной задачей является осуществление мер по оптимизации режимов работы системы тягового электроснабжения подобных участков. В статье методом имитационного моделирования с применением программно-вычислительного комплекса «Кортэс» выполнена оценка предлагаемых мер усовершенствования системы тягового электроснабжения участка обхода СМ-тоннеля – одного из наиболее протяженных в России. Сравнительный анализ рассмотренных мероприятий позволил предложить к реализации комплекс средств усиления: устройство продольной компенсации реактивной мощности на двух концевых тяговых подстанциях, питающих тяговую сеть участка обхода тоннеля, и увеличение сечения отсасывающего провода на тяговой подстанции, расположенной на участке с наибольшим подъемом вдоль всего обхода. Эти изменения позволят поднять напряжение в контактной сети до минимально допустимого и избежать перегрева отсасывающего провода и в совокупности позволят решить поставленную задачу по обеспечению перспективной пропускной способности исследуемого участка.

Ключевые слова

система тягового электроснабжения, оптимизация режимов, обход тоннеля, устройство продольной компенсации, увеличение сечения отсасывающего провода

Для цитирования

Пузина Е.Ю. Оптимизация режимов работы системы тягового электроснабжения на участке обхода тоннеля / Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4 (84). С. 42–53. DOI 10.26731/1813-9108.2024.4(84).42-53.

Информация о статье

поступила в редакцию: 11.11.2024 г.; поступила после рецензирования: 04.12.2024 г.; принята к публикации: 05.12.2024 г.

Optimization of operation modes of the traction power supply system at the tunnel bypass site

E.Yu. Puzina✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉lena-rus05@mail.ru

Abstract

In the near future up to 2030, it is planned to significantly increase cargo turnover along the Eastern polygon, and in particular along the Baikal-Amur Railway. Since this road has a rather complex track profile with ascents reaching 16–17%, and many tunnels to reduce the distances between stations, in some of its sections there is a problem of limiting the capacity of the traction power supply system when passing heavy trains. In order to organize uninterrupted train traffic along sections of this road in the event of the withdrawal of existing, especially long, tunnels for repair, and also, given the increase in the number and mass of trains in the future, an urgent task is to develop measures to optimize the operating modes of the traction power supply system for such sections. In this work, by the method of simulation modeling using the «Kortes» software and computing complex, an assessment of the proposed measures for optimizing the traction power supply system of the bypass section of the SM tunnel, one of the longest in Russia, was carried out. A comparative analysis of the considered measures made it possible to propose a set of reinforcement tools for implementation: devices for longitudinal compensation of reactive power at two terminal traction substations feeding the traction network of the bypass section and an increase in the cross section of the suction wire at the traction substation located in the section with the greatest rise along the entire bypass. These measures will allow to raise the voltage in the contact network to the minimum permissible and avoid overheating of the suction wire and, in total, will make it possible to solve the task of ensuring the prospective throughput of the studied area.

Keywords

traction power supply system, optimization of modes, tunnel bypass, longitudinal compensation device, increasing the cross section of the suction wire

For citation

Puzina E.Yu. Optimizatsiya rezhimov raboty sistemy tyagovogo electrosnabzheniya na uchastke obkhoda tonnelya [Optimization of operation modes of the traction power supply system at the tunnel bypass site]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, No. 4(84), pp. 42–53. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.4(84).42-53.

Article Info

Received: November 11, 2024; Revised: December 4, 2024; Accepted: December 5, 2024.

Введение

В послании Федеральному собранию 29 февраля 2024 г. Президент РФ В.В. Путин анонсировал запуск третьего этапа развития Байкало-Амурской (БАМ) и Транссибирской магистралей. Реализация проекта позволит увеличить провозную способность магистралей до 210 млн т, что на 37 млн т больше текущих показателей.

БАМ – уникальная железнодорожная линия, одна из крупнейших в мире. Скованная горными массивами и реками, участками вечной мерзлоты, трасса магистрали пролегает по территориям сразу шести регионов России (Иркутская область, Бурятия, Забайкальский край, Якутия, Амурская область и Хабаровский край).

Развитие БАМа играет важнейшую стратегическую роль в экономике страны по нескольким аспектам:

1. Транспортная связь. Дорога обеспечивает железнодорожное сообщение центральных регионов России с Тихоокеанским побережьем, разгружает движение Транссибирской магистрали.

2. Развитие регионов присутствия. Активизация экономической деятельности на территориях регионов БАМа и приграничных территориях. БАМ проходит через регионы, богатые природными ресурсами, включая золото, уголь, нефть и газ.

3. Транспортировка сырья до потребителей. Обеспечение более равномерного развития страны и более эффективного использования ресурсов.

4. Развитие туризма. БАМ проходит через уникальные природные ландшафты. Усовершенствование магистрали и инфраструктуры вдоль нее создает условия для привлечения внутренних туристов.

Таким образом, развитие БАМа стимулирует экономику регионов, облегчает транспор-

тировку грузов и пассажиров, создает новые рабочие места и привлекает инвестиции. В целом магистраль играет ключевую роль в инфраструктурном развитии Российской Федерации и способствует сбалансированному и устойчивому экономическому росту страны [1, 2].

Однако отдельные участки данной дороги являются «узким местом» с точки зрения пропускной способности системы тягового электроснабжения (СТЭ) [3, 4]. К таким относится и так называемый обход СМ-тоннеля.

Целью данной работы является разработка технических решений по оптимизации режимов работы СТЭ на участке обхода СМ-тоннеля, что поможет решить проблему его пропускной способности.

Постановка задачи исследования

СМ-тоннель проложен в условиях вечной мерзлоты. Серьезную проблему в его эксплуатации вызывают обильные подземные воды. Он отличается уникально большой протяженностью – более 15 км. При этом порядка 400 м тоннеля проходят под пониженной кровлей скальных пород. Высока сейсмичность в месте расположения – девять баллов.

На время строительства СМ-тоннеля был проложен временный обход для осуществления перевозок грузов и пассажиров. Его длина составляла 24,6 км, при этом профиль пути отличался более чем серьезными уклонами – до 40 %. Поэтому перевозка грузов была организована поездами, содержащими небольшое количество вагонов, а пассажиров и вовсе перевозили через перевал автобусным транспортом.

Во второй половине 80-х гг. прошлого века этот переход демонтировали и построили новый протяженностью 64 км. Этот обход отличался наличием большого числа серпантинных и виадуктов. Также были построены два петлевых тоннеля. В результате скорость движения

поездов достигала максимум 20 км/ч, был высок риск схода лавин. Кроме того, приходилось активно использовать подталкивание поездов. Эксплуатирующие этот обход организации несли значительные расходы по его содержанию. Большое внимание уделялось обеспечению безопасности движения поездов.

Работы по подготовке строительства тоннеля продолжались с 1975 по 1977 г. При этом в ней участвовали около 4,9 тыс. чел. О масштабах работ говорят следующие факты: общий объем переработанного грунта – свыше 2 000 000 м³; количество уложенного железобетона – порядка 700 000 м³; масса возведенных металлоконструкций – 70 000 т.

Завершающая сбойка была осуществлена в марте 2001 г. Первый поезд прошел в декабре 2001 г., но окончательно СМ-тоннель был открыт только в декабре 2003 г.

Ввод в эксплуатацию данного тоннеля привел к существенному сокращению протяженности пути движения поездов – на 33 км, время движения по этому участку сократилось на 135 мин., появилась возможность осуществлять движение поездов без подталкивания. Существенно сократились эксплуатационные расходы и вырос уровень безопасности движения поездов. Вместе с тем ввод в эксплуатацию данного тоннеля не означал отказ от частичного движения поездов по обходному пути. Обход можно было более активно использовать

при переориентации части грузопотока с главного хода Транссибирской магистрали в направлении БАМа, что и заложено в программе развития Восточного полигона, а также во время ремонта СМ-тоннеля, при капитальном ремонте которого обход должен быть задействован максимально.

Поскольку в настоящее время реализуется третий этап развития Восточного полигона, то актуальной задачей является развитие пропускной способности и оптимизация режимов работы СТЭ на участке обхода СМ-тоннеля БАМа.

Анализ пропускной способности системы тягового электроснабжения обхода тоннеля

СТЭ участка обхода СМ-тоннеля включает в себя пять тяговых подстанций (ЭЧЭ): ЯН, АН, ПР, ОК, УЛ, причем первая и последняя ЭЧЭ включены в расчет с целью полноценной нагрузки подстанций АН и ОК. Таким образом, общая протяженность исследуемого участка составляет 133 км. По всей длине участка отсутствуют посты секционирования. Также отметим тот факт, что на межподстанционных зонах (МПЗ) ЯН – АН, АН – ПР и ПР – ОК используется СТЭ 1×25 кВ и трехфазные тяговые силовые трансформаторы. На МПЗ ОК – УЛ используется СТЭ 2×25 кВ и однофазные тяговые трансформаторы.

План мероприятий по увеличению пропускной и провозной способностей Восточного

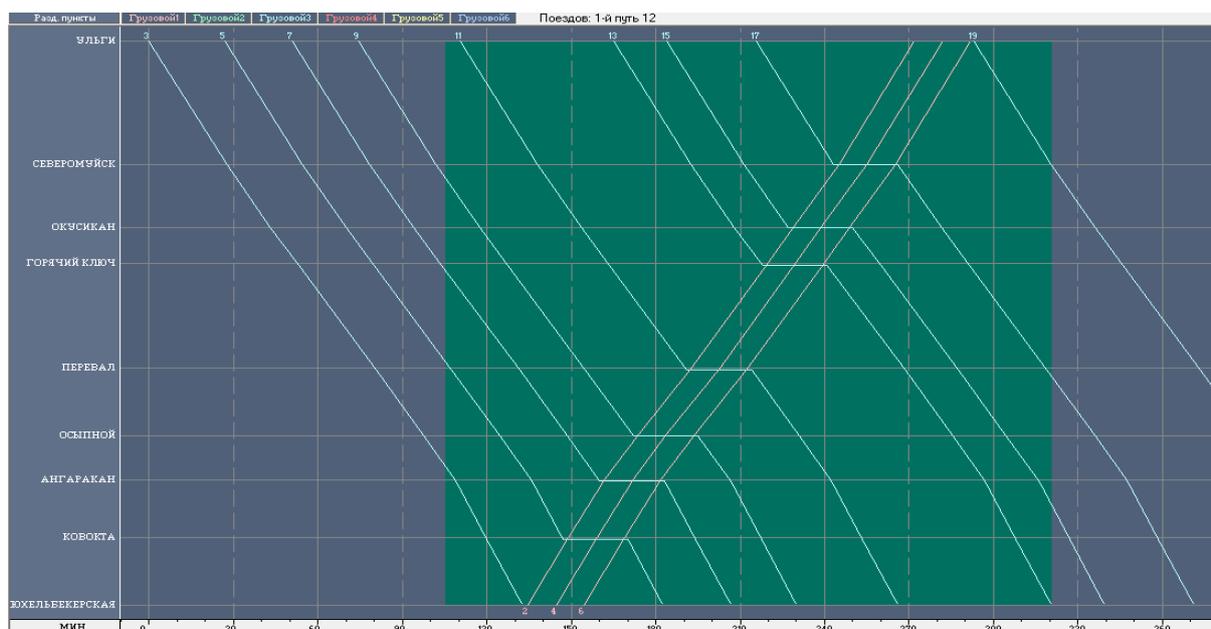


Рис. 1. Расчетный график движения

Fig. 1. Estimated traffic schedule

полигона на первом и втором этапах включает в себя реализацию мероприятий по усилению СТЭ БАМа, в том числе и на участке обхода СМ-тоннеля:

- установка устройств продольной компенсации (УПК) на ЭЧЭ ЯН мощностью 9,6 МВАр;

- строительство однострансформаторной ЭЧЭ УЛ;

- установка дополнительного тягового трансформатора и УПК мощностью 14,4 МВАр на ЭЧЭ ОК.

Учетом при оценке пропускной способности СТЭ исследуемого участка данные средства усиления.

Согласно методике определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования при определении минимальных интервалов в интенсивный час на однопутном участке используется частично-пакетный график – при безостановочном пропуске пакета из трех поездов повышенного веса (7 100 т) с интервалом 10 мин. в направлении наибольшего токопотребления (четное) и скрещении этого пакета со встречными поездами графической массы (5 708 т согласно письму № ИСХ-1389/ИЭРТ от 4 августа 2021 г.) на всех раздельных пунктах с путевым развитием.

Вид расчетного графика в интенсивный час на однопутном участке представлен на рис. 1.

Результаты расчета режима работы существующей СТЭ на участке ЯН – УЛ, полученные путем имитационного моделирования [5–10] в ПВК «Кортэс», представлены в табл. 1. Лимитирующей зоной является МПЗ АН – ПР. Ограничивающий параметр – минимальное напряжение на токоприемнике электровоза, равное 16,82 кВ (при допустимом значении не менее 21 кВ).

Разработка мер оптимизации работы устройств системы тягового электроснабжения на участке обхода СМ-тоннеля

Возможно использовать несколько мер оптимизации работы устройств электроснабжения [11–16], которые в дальнейшем будут способствовать и повышению надежности функционирования железных дорог в целом [17–20].

1. Применение усиливающего провода и увеличение сечения несущего троса.

Усиливающие провода (УП) вводят в состав контактной подвески, соединяя их параллельно в среднем через каждые 150 м с контактным проводом с целью уменьшения общего сопротивления контактной сети (КС). Это позволяет уменьшить потери электроэнергии в СТЭ, снизить падение напряжения в тяговой сети и, тем самым, поднять уровень напряжения в КС.

Такая мера способствует увеличению пропускной способности СТЭ соответствующего участка либо позволяет при отсутствии та-

Таблица 1. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электроснабжения участка ЯН – УЛ

Table 1. Main characteristics of the operating mode of the traction power supply system of the YaN – UL section

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Коэффициент нагрузки силового трансформатора Power transformer load factor	1,05 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С Power transformer oil temperature	66 (ЭЧЭ ОК)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее 3-х-минутное Voltage in the contact network, kV (section AN – PR): minimum 3-minute average	16,77 16,82
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature, °С	90 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature, °С	72 (ЭЧЭ ПР)

кой необходимости увеличить расстояние между подстанциями на участке.

Существующая контактная подвеска на МПЗ АН – ПР – М-95 + МФ-100 + А-185, т.е. в настоящее время уже используется УП. Выполним расчет в ПВК «Кортэс», добавив в имеющуюся на данном участке контактную подвеску еще один УП марки А-185.

Основные характеристики рабочего режима СТЭ участка ЯН – УЛ при использовании дополнительного УП приведены в табл. 2.

Видим, что за счет увеличения сечения контактной подвески удастся поднять минимальное напряжение в КС МПЗ АН – ПР всего лишь с 16,82 кВ до 16,89 кВ. Единственный существенный положительный фактор – это снижение температуры нагрева проводов КС с 90 до 68 °С.

Рассмотрим результаты расчета с применением контактной подвески большего сечения и дополнительным УП – для подвески М-120 + МФ-100 + 2А-185 (табл. 3).

Таблица 2. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электроснабжения участка ЯН – УЛ при использовании дополнительного усиливающего провода

Table 2. Main characteristics of the operating mode of the traction power supply system of the YaN – UL section when using an additional reinforcing wire

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Коэффициент нагрузки силового трансформатора Power transformer load factor	1,05 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С Power transformer oil temperature	65 (ЭЧЭ ОК)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее трехминутное Voltage in the contact network, kV (section AN – PR): minimum 3-minute average	16,83 16,89
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature, °С	68 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature, °С	71 (ЭЧЭ ПР)

Таблица 3. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электроснабжения участка ЯН – УЛ при использовании дополнительного усиливающего провода и несущего троса большего сечения

Table 3. The main characteristics of the operating mode of the YaN – UL traction power supply system when using an additional reinforcing wire and a bearing cable with a larger cross section

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Коэффициент нагрузки силового трансформатора Power transformer load factor	1,05 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С Power transformer oil temperature	65 (ЭЧЭ ОК)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее трехминутное Voltage in the contact network, kV (section AN – PR): minimum 3-minute average	16,87 16,93
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature, °С	67 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature, °С	71 (ЭЧЭ ПР)

Как видим, напряжение в КС увеличивается всего лишь с 16,82 до 16,93 кВ.

Приходим к выводу, что применение рассмотренных мер оптимизации нецелесообразно.

2. Оптимизация схемы питания.

На участке ЯН – УЛ в настоящее время отсутствуют посты секционирования (ПС). Наиболее эффективно строительство ПС в середине МПЗ, т.е. в месте наибольшей просадки напряжения при двусторонней схеме питания.

ПС КС выполняют следующие функции: соединение секций КС; снижение потерь электроэнергии; защита КС от коротких замыканий; отключение поврежденных секций и перераспределение электроэнергии между участками КС в зависимости от нагрузки.

В данном разделе анализируем эффективность применения ПС в середине лимитирующей МПЗ АН – ПР – на 1 356,5 км.

В табл. 4 представлены результаты расчета рабочего режима СТЭ при строительстве нового ПС.

Приходим к выводу, что строительство ПС без дополнительных мер оптимизации нецелесообразно, так как минимальное напряжение в КС на лимитирующей зоне не меняется.

3. Применение устройств компенсации реактивной мощности.

Для компенсации реактивной мощности в СТЭ используется два вида устройств – устройства продольной компенсации (УПК) и устройства поперечной компенсации (регулируемые – УКРМ, нерегулируемые – КУ).

Все виды установок – УПК, УКРМ и КУ – приводят к улучшению имеющихся параметров СТЭ. Так, УПК уменьшает реактивное сопротивление, а, следовательно, и полное сопротивление тяговой сети, вызывая, тем самым, уменьшение падения напряжения в ней, что существенно влияет на рост уровня напряжения на токоприемнике электровоза. УКРМ и КУ, будучи параллельно подключенными к тяговой нагрузке, приводят к уменьшению реактивного, а, следовательно, и полного тока в СТЭ, что приводит к более чем значительному (в квадратичной зависимости от тока) снижению потерь электроэнергии. При этом УКРМ еще и позволяют плавно управлять величиной реактивной мощности, помогая, в том числе, избежать перекомпенсации этой мощности при снижении объема грузоперевозок в отдельные моменты времени.

По первому и второму этапам развития БАМа на исследуемом участке уже используются УПК на следующих ЭЧЭ: на ЯН и ОК, соответственно, номинальной мощностью 9,6 и 14,4 МВАр.

Выполним моделирование СТЭ исследуемого обходного участка при монтаже дополнительных компенсирующих устройств: УКРМ на ПС в МПЗ АН – ПР и УПК на ЭЧЭ АН и ЭЧЭ ПР.

4. Монтаж дополнительных устройств поперечной компенсации.

Применение УКРМ позволяет разгрузить СТЭ от реактивной мощности, помогает работать

Таблица 4. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электроснабжения участка ЯН – УЛ при строительстве нового поста секционирования

Table 4. Main characteristics of the operating mode of the traction power supply system of the YaN – UL section during the construction of a new sectioning post

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Коэффициент нагрузки силового трансформатора Power transformer load factor	1,05 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С Power transformer oil temperature	65 (ЭЧЭ ОК)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее трехминутное Voltage in the contact network, kV (section AN – PR): minimum 3-minute average	16,78 16,82
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature, °С	90 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature, °С	71 (ЭЧЭ ПР)

в более энергоэффективном режиме, высвобождает дополнительную мощность для нагрузки.

Наиболее эффективный способ применения устройства поперечной компенсации КУ – установка в середине МПЗ на ПС.

Выполним расчет параметров устройств поперечной компенсации.

Потребную мощность компенсирующих устройств $Q_{ку}$, кВАр, найдем по формуле (1):

$$Q_{ку} = 1,1 \cdot P_{ф} (\operatorname{tg}(\varphi_p) - \operatorname{tg}(\varphi_э)), \quad (1)$$

где $P_{ф}$ – фактически потребляемая активная мощность, равная 15 138 кВт, исходя из результатов выполненного ранее имитационного моделирования; $\operatorname{tg}(\varphi_p)$ – расчетный коэффициент реактивной мощности, 0,82; $\operatorname{tg}(\varphi_э)$ – экономический коэффициент реактивной мощности, задаваемый электроснабжающей организацией (принимаем 0,33); 1,1 – коэффициент запаса.

По формуле (1) имеем:

$$Q_{ку} = 1,1 \cdot 15\,138 \cdot (0,82 - 0,33) = 8\,159,4 \text{ кВАр.}$$

Значение установленной мощности $Q_{уст}$, кВАр, определим по формуле (2):

$$Q_{уст} = Q_{ку}/K_q, \quad (2)$$

где K_q – коэффициент полезного использования мощности установки компенсации для условий тяговой нагрузки, равный 0,5. По формуле (2) имеем:

$$Q_{уст} = 8\,159,4/0,5 = 16\,318,8 \text{ кВАр.}$$

В настоящее время на железных дорогах внедряются регулируемые компенсирующие устройства, способные гибко подстраивать необходимую мощность устройства в зависимости от потребляемой энергии. Поэтому при

имитационном моделировании будем учитывать компенсацию полученного значения реактивной мощности.

Результаты имитационного моделирования при использовании устройства поперечной компенсации на новом ПС в середине лимитирующей МПЗ АН – ПР представлены в табл. 5.

Видим, что монтаж УКРМ на предложенном к строительству ПС в МПЗ АН – ПР уже в большей мере воздействует на уровень напряжения на токоприемнике электровоза, поднимая его с 16,82 кВ до 17,64, что, тем не менее, существенно ниже допустимого значения – 21 кВ.

5. Применение устройств продольной компенсации.

УПК эффективно повышает напряжение в тяговой сети за счет снижения ее комплексного сопротивления. Возможные варианты монтажа УПК: в отсасывающую линию; в контактный и питающий провода (для СТЭ 2×25 кВ). Наиболее эффективным вариантом является монтаж УПК в отсос ЭЧЭ, так как в отсосе протекает весь тяговый ток подстанции.

В данном разделе выполним анализ эффективности применения УПК на подстанциях АН и ПР по отдельности и совместно.

Выполним расчет параметров УПК. Суммарное сопротивление до тяговых шин при наличии УПК X_{Σ} , рассчитаем по формуле (3):

$$X_{\Sigma} = X_c + X_t - X_{упк}, \quad (3)$$

где X_c – сопротивление сети внешнего электропитания, Ом; X_t – сопротивление тягового

Таблица 5. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электроснабжения участка ЯН – УЛ при установке регулируемого устройства поперечной компенсации на новом посту секционирования
Table 5. Main characteristics of the operating mode of the traction power supply system of the YAN-UL section when installing an adjustable transverse compensation device at a new sectioning post

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Коэффициент нагрузки силового трансформатора Power transformer load factor	1,05 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С Power transformer oil temperature	65 (ЭЧЭ ОК)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее трехминутное Voltage in the contact network, kV (section AN – PR): minimum 3-minute average	17,59 17,64
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature, °С	86 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature, °С	70 (ЭЧЭ ПР)

трансформатора, Ом; $X_{\text{упк}}$ – сопротивление устройства продольной компенсации, Ом.

Величину сопротивления тягового трансформатора вычислим по формуле (4):

$$X_T = \frac{3U_k U_n^2}{100S_{\text{тн}}}, \quad (4)$$

где U_k – напряжение короткого замыкания тягового трансформатора, %; U_n – номинальное напряжение на шинах тягового распределительного устройства, В; $S_{\text{тн}}$ – номинальная мощность тягового трансформатора, ВА.

На тяговых подстанциях (ЭЧЭ) АН и ПР установлены трехфазные трансформаторы ТДТНЖ мощностью 40 МВА. По формуле (4) имеем:

$$X_T = \frac{3 \cdot 12 \cdot 27500^2}{100 \cdot 40\,000\,000} = 6,81 \text{ Ом.}$$

Сопротивление сети внешнего электропитания X_c найдем по формуле (5):

$$X_c = \frac{3U_n^2}{S_{\text{к.з.}}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{к.з.}}$ – мощность короткого замыкания на вводах тяговой подстанции, ВА.

Для ЭЧЭ АН по формуле (5) имеем:

$$X_c = \frac{3 \cdot 27500^2}{603\,000\,000} = 3,76 \text{ Ом.}$$

Для ЭЧЭ ПР по формуле (5) имеем:

$$X_c = \frac{3 \cdot 27500^2}{610\,000\,000} = 3,72 \text{ Ом.}$$

Сопротивление УПК подбирается по формуле (6):

$$X_{\text{упк}} = \frac{X_{\Sigma c}}{3}. \quad (6)$$

По формуле (6) для ЭЧЭ АН имеем:

$$X_{\text{упк}} = \frac{6,81 + 3,76}{3} = 3,52 \text{ Ом.}$$

По формуле (6) для ЭЧЭ ПР имеем:

$$X_{\text{упк}} = \frac{6,81 + 3,72}{3} = 3,51 \text{ Ом.}$$

По результатам расчета для ЭЧЭ АН и ПР выбираем УПК с номинальной реактивной мощностью 9,6 МВАр на сопротивление 3,75 Ом.

В табл. 6 представлены результаты расчета при монтаже УПК мощностью 9,6 МВАр в отсесе ЭЧЭ АН, ПР по отдельности и совместно.

Результаты, приведенные в табл. 6, позволяют сделать следующие выводы:

- применение УПК на ЭЧЭ АН поднимает напряжение в КС до 18,62 кВ, но одновременно повышается температура нагрева отсасывающего провода на ЭЧЭ АН с 62 до 89 °С;
- монтаж УПК на ЭЧЭ ПР вызывает рост напряжения до 19,64 кВ, но существенно воз-

Таблица 6. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электроснабжения участка ЯН – УЛ при установке устройства продольной компенсации

Table 6. Main characteristics of the operating mode of the traction power supply system of the YaN – UL section when installing a longitudinal compensation device

Наименование параметра Parameter name	Значение Value		
	Монтаж устройства мощностью 9,6 МВАр в отсесе тяговой подстанции Installation of a 9,6 MVAr device in the suction of a traction substation		
	АН	ПР	АН и ПР
Коэффициент нагрузки силового трансформатора Power transformer load factor	1,16	1,40	1,27 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С Power transformer oil temperature	67	71	68 (ЭЧЭ ПР)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее трехминутное Voltage in the contact network, kV (section AN - PR): minimum 3-minute average	18,54 18,62	19,52 19,64	21,05 21,12
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature	90	117	98 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature	89	132	117 (ЭЧЭ ПР)

Таблица 7. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электроснабжения участка ЯН – УЛ при установке устройства продольной компенсации на ЭЧЭ АН и ПР и увеличении сечения отсоса на ЭЧЭ ПР

Table 7. Main characteristics of the operating mode of the traction power supply system of the YaN – UL section when installing a longitudinal compensation device on the ECHE AN and PR and increasing the suction cross-section on the ECHE PR

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Коэффициент нагрузки силового трансформатора	1,27 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С	68 (ЭЧЭ ОК)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее трехминутное Voltage in the contact network, kV (section AN – PR): minimum среднее трехминутное 3-minute average	21,05 21,12
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature	98 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature	90 (ЭЧЭ ПР)

растает температура отсасывающего провода на ЭЧЭ ПР – до 132 °С;

– включение УПК одновременно на ЭЧЭ АН и ЭЧЭ ПР решает проблему недостаточного уровня напряжения в КС, поскольку его величина достигает минимально допустимого значения – 21,12 кВ, но приводит к перегреву отсасывающей линии на ЭЧЭ ПР – до 117 °С.

Следовательно, целесообразно рассмотреть применение этого варианта усиления с увеличением сечения отсоса на ЭЧЭ ПР.

6. Увеличение сечения отсоса и монтаж устройства продольной компенсации на ЭЧЭ АН и ПР.

Выполним аналогичные расчеты, но с увеличенным сечением отсоса на ЭЧЭ ПР – с 3×А-185 до 3×А-240. Результаты представлены в табл. 7.

Таким образом, монтаж УПК на ЭЧЭ АН и ПР при одновременном увеличении сечения отсоса на ЭЧЭ ПР позволяет справиться с проблемами низкого напряжения (повышается с 16,82 кВ до 21,12) и перегрева отсасывающей

линии на ЭЧЭ ПР. Данную меру оптимизации возможно рекомендовать к применению.

Заключение

В ходе выполнения исследования разработаны меры оптимизации работы СТЭ участка обхода СМ-тоннеля.

Проведя анализ нескольких мер, способствующих обеспечению необходимой пропускной способности СТЭ исследуемого участка при перспективных размерах движения на 2030 г., рекомендовано к практическому применению следующее: монтаж УПК мощностью 9,6 МВАр на ЭЧЭ АН и ПР и увеличение сечения отсасывающего провода до 3×240 мм² на ЭЧЭ ПР.

Реализация разработанных мер оптимизации обеспечит надежное функционирование СТЭ исследуемого участка в случае капитального ремонта СМ-тоннеля и также при увеличении грузопотока по Восточному полигону, значительная часть которого будет переориентирована в направлении БАМа.

Список литературы

1. Крапивин М.И., Куцый А.П., Пузина Е.Ю. Разработка технических решений по увеличению пропускной способности системы тягового электроснабжения участка Восточного полигона // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России : сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. Сургут, 2024. С. 180–186.
2. Бардушко А.Ю., Куцый А.П. Повышение пропускной способности электрифицированного участка железной дороги Якурим – Киренга на перспективу // Молодая наука Сибири. 2023. № 4 (22). С. 182–193. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/1548/1038> (Дата обращения 18.08.2024).
3. Крапивин М.И., Пузина Е.Ю. Разработка предложений по устранению лимитирующих межподстанционных зон при развитии Восточного полигона // Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2024. С. 61–65.

4. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018. P. 1–5. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
5. Галков А.А., Худоногов И.А. Применение технологии «виртуальной сцепки» при усилении системы тягового электроснабжения на участке Зима – Иркутск-Сортировочный // Повышение эффективности эксплуатации электромеханических преобразователей энергии в промышленности и на транспорте : материалы X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. Омск, 2023. С 215–220.
6. Girnik A.S., Fedyanin A.L. Simulation of Auxiliary Induction Motors with Asymmetric Power and Circuit Rotor in Using on the Locomotives // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST). Tomsk, 2012. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357674.
7. Учет влияния устройств фильтрации и компенсации на показатели качества электрической энергии СТЭ при пропуске поездов повышенной массы / Е.А. Морозов, В.В. Фареньк, М.В. Востриков и др. // Молодая наука Сибири. 2022. № 4 (18). С. 94–108. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/933> (Дата обращения 18.09.2024).
8. Овечкин И.С., Пузина Е.Ю. Снижение несимметрии напряжения воздушных линий, питающих устройства автоблокировки // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2023. № 4 (60). С. 84–95.
9. Лобанов О.В. Система мониторинга работоспособности металлических опорных конструкций для скоростного и высокоскоростного движения электроподвижного состава // Инновационный производственные технологии и ресурсосберегающая энергетика : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 2021. С. 245–250.
10. Овечкин И.С. Моделирование режимов двойных замыканий на землю в технологических ЛЭП напряжением 35 кВ // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2024. Т. 2. С. 255–261.
11. Зарубин А.Д., Астраханцев Л.А. Анализ систем тягового электроснабжения // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 214–220. URL: https://mnv.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/doklad_analiz_sistem_tyagovogo_elektrosnabzheniya.pdf (Дата обращения 18.09.2024).
12. Козлов Д.Г., Колпакова О.А., Хляка С.В. Повышение надежности электроснабжения // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2023. С. 100–104.
13. Оценка качества напряжения на шинах 27,5 кВ тяговой подстанции с устройством продольной емкостной компенсации / С.И. Макашева, П.С. Пинчуков, А.Р. Мамаев и др. // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. 2020. № 3 (88). С. 11–20.
14. Паскарь И.Н., Москалева К.А. Регулирование напряжения в энергосистеме с применением мультиагентного подхода // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 1 (159). С. 36–45.
15. Кубкина О.В., Лысенко В.Г. Энергообеспечение мониторинга параметров системы тягового электроснабжения // Инженерный вестник Дона. 2023. № 11 (107). С. 714–724.
16. Коновалов И.Д., Некрасова В.Н., Волков М.А. К вопросу повышения качества электроснабжения потребителей // Науч.-техн. вестник Поволжья. 2023. № 10. С. 200–205.
17. Влияние надежности электроснабжения и качества электрической энергии на эффективность функционирования электроэнергетической системы / М.А. Дубицкий, Е.В. Зубова, Р.Г. Любонников и др. // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2020. Т. 1. С. 102–108.
18. Пультяков А.В., Трофимов Ю.А., Скоробогатов М.Э. Комплексные решения по повышению устойчивости работы устройств автоматической локомотивной сигнализации на участках с электротягой переменного тока // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2015. Т. 1. С. 328–332.
19. Каимов Е.В., Оленцевич В.А., Власова Н.В. Проблемы формирования, развития и реконструкции элементов инфраструктурного комплекса железных дорог // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Чита, 2022. Т. 1. С. 288–296.
20. К повышению надежности устройств контактной сети / А.С. Есауленко, В.П. Ступицкий, В.А. Тихомиров и др. // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 200–205. URL: https://mnv.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/statya_esaulenko_gotovo.pdf (Дата обращения 18.09.2024).

References

1. Krapivin M.I., Kutsyi A.P., Puzina E.Yu. Razrabotka tekhnicheskikh reshenii po uvelicheniyu propusknoi sposobnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Vostochnogo poligona [Development of technical solutions to increase the capacity of the traction power supply system of the Eastern polygon site]. *Sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy elektroenergetiki i telekommunikatsii Severa Rossii»* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference «Problems of electric power industry and telecommunications of the North of Russia»]. Moscow, 2024. pp. 180–186.
2. Bardushko A.Yu., Kutsyi A.P. Povyshenie propusknoi sposobnosti elektrifitsirovannogo uchastka zheleznoi dorogi Yakurim – Kirenga na perspektivu [Increasing the capacity of the electrified section of the Yakurim – Kirenga railway for the future]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 4 (22), pp. 182–193.
3. Krapivin M.I., Puzina E.Yu. Razrabotka predlozhenii po ustraneniyu limitiruyushchikh mezhpodstantsionnykh zon pri razviti Vostochnogo poligona [Development of proposals for the elimination of limiting substation zones in the development of the Eastern polygon]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Issledovanie i razvitie rel'sovogo i avtomobil'nogo transporta»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Research and development of rail and road transport»]. Ekaterinburg, 2024, pp. 61–65.

4. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018, pp. 1–5.
5. Galkov A.A., Khudonogov I.A. Primenenie tekhnologii «virtual'noi sstepki» pri usilenii sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na uchastke Zima – Irkutsk-Sortirovochnyi [Application of the «virtual coupling» technology when strengthening the traction power supply system on the Zima – Irkutsk-Sortirovochnyi section]. *Materialy X Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii elektromekhanicheskikh preobrazovatelei energii v promyshlennosti i na transporte»* [Proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation «Improving the efficiency of operation of electromechanical energy converters in industry and transport»]. Omsk, 2023, pp. 215–220.
6. Girnuk A.S., Fedyanin A.L. Simulation of Auxiliary Induction Motors with Asymmetric Power and Circuit Rotor in Using on the Locomotives // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST). Tomsk, 2012. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357674.
7. Morozov E.A., Farenok V.V., Vostrikov M.V., Tikhomirov V.A. Uchet vliyaniya ustroystv fil'tratsii i kompensatsii na pokazateli kachestva elektricheskoi energii STE pri propuske poezdov povyshennoi massy [Consideration of the influence of filtration and compensation devices on the quality of electric energy of the traction power supply system when passing trains of increased mass]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2022, no 4 (18), pp. 94–108.
8. Ovechkin I.S., Puzina E.Yu. Snizhenie nesimmetrii napryazheniya vozdukhnykh linii, pitayushchikh ustroystva avtoblokirovki [Reduction of voltage asymmetry of overhead lines feeding auto-locking devices]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2023, no 4 (60), pp. 84–95.
9. Lobanov O.V. Sistema monitoringa rabotosposobnosti metallicheskh opornykh konstruksii dlya skorostnogo i vysokoskorostnogo dvizheniya elektropodvizhnogo sostava [System for monitoring the operability of metal support structures for high-speed and high-speed movement of electric rolling stock]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnyi proizvodstvennye tekhnologii i resursosbergayushchaya energetika»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Innovative production technologies and resource-saving energy»]. Omsk, 2021, pp. 245–250.
10. Ovechkin I.S. Modelirovanie rezhimov dvoynykh zamykaniy na zemlyu v tekhnologicheskikh LEP napryazheniem 35 kV [Modeling of double earth fault modes in technological power lines with a voltage of 35 kV]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation «Improving the efficiency of energy production and use in Siberia»]. Irkutsk, 2024, pp. 255–261.
11. Zarubin A.D., Astrakhantsev L.A. Analiz sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [Analysis of traction power supply systems]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no 2 (12), pp. 214–220.
12. Kozlov D.G., Kolpakova O.A., Khlyaka S.V. Povyshenie nadezhnosti elektrosnabzheniya [Improving the reliability of power supply]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka i obrazovanie na sovremennoy etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya v APK»* [Proceedings of the international scientific and practical conference «Science and education at the present stage of development: experience, problems and solutions in agriculture»]. Voronezh, 2023, pp. 100–104.
13. Makasheva S.I., Pinchukov P.S., Mamaev A.R., Terletskii S.G. Otsenka kachestva napryazheniya na shinakh 27,5 kV tyagovoi podstantsii s ustroystvom prodol'noi emkostnoi kompensatsii [Evaluation of the quality of voltage on 27,5 kV tines of a traction substation with a longitudinal capacitive compensation device]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2020, no 3 (88), pp. 11–20.
14. Paskar' I.N., Moskaleva K.A. Regulirovanie napryazheniya v energosisteme s primeneniem mul'tiagentnogo podkhoda [Voltage regulation in the power system using a multi-agent approach]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2022, no 1 (159), pp. 36–45.
15. Kubkina O.V., Lysenko V.G. Energoobespechenie monitoringa parametrov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Energy supply for monitoring parameters of traction power supply system]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2023, no 11 (107), pp. 714–724.
16. Kononov I.D., Nekrasova V.N., Volkov M.A. K voprosu povysheniya kachestva elektrosnabzheniya potrebiteli [On the issue of improving the quality of power supply to consumers]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region], 2023, no 10, pp. 200–205.
17. Dubitskii M.A., Zubova E.V., Lyubovnikov R.G., Makarova A.V. Vliyaniye nadezhnosti elektrosnabzheniya i kachestva elektricheskoi energii na effektivnost' funktsionirovaniya elektroenergeticheskoi sistemy [Influence of reliability of power supply and quality of electric energy on the efficiency of functioning of the electric power system]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation «Improving the efficiency of production and use of energy in Siberia»]. Irkutsk, 2020, Vol. 1, pp. 102–108.
18. Pul'tyakov A.V., Trofimov Yu.A., Skorobogatov M.E. Kompleksnye resheniya po povysheniyu ustoichivosti raboty ustroystv avtomaticheskoi lokomotivnoi signalizatsii na uchastkakh s elektrotiyagovoi peremennogo toka [Integrated solutions to improve the stability of automatic locomotive signaling devices in areas with alternating current electric traction]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2015, Vol. 1, pp. 328–332.
19. Kaimov E.V., Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Problemy formirovaniya, razvitiya i rekonstruksii elementov infrastrukturnogo kompleksa zheleznykh dorog [Problems of formation, development and reconstruction of elements of the railway infrastructure complex]. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2-kh t.)* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with interna-

tional participation «Education – Science – Production» (in 2 vol.]). Chita, 2022, Vol. 1, pp. 288–296.

20. Esaulenko A.S., Stupitskii V.P., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. K povysheniyu nadezhnosti ustroystv kontaktnoi seti [To increase the reliability of contact network devices]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no 2 (12), pp. 200–205.

Информация об авторах

Пузина Елена Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

Information about the authors

Elena Yu. Puzina, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

Сопоставительный анализ показателей травматизма на автодорогах Иркутской области в 2022–2023 гг.

В.С. Асламова¹, А.А. Асламов², А.А. Шуткин³

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

²Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

³Пожарно-спасательная служба Иркутской области, г. Иркутск, Российская Федерация

✉aslamovav@yandex.ru

Резюме

В статье сопоставлены значения транспортного и социального рисков для России, Иркутской области и Красноярского края, показывающие, что запланированного снижения социального риска (четыре смертельных исхода в дорожно-транспортных происшествиях на 100 тыс. населения) достичь вряд ли удастся. Наблюдалось снижение социального риска по России в целом и в Красноярском крае соответственно в 1,21 и 1,15 раза относительно 2018 г. Приведены показатели автодорожного травматизма для рассматриваемых регионов, демонстрирующие его рост. Выполнен детальный анализ статистики показателей травматизма на дорогах Иркутской области, установлены его причины. В общем объеме дорожно-транспортных происшествий 87,93 % составляют случаи, произошедшие из-за нарушения правил дорожного движения водителями, в которых смертность достигла 87,67 %, доля получивших ранения – 91,05 %. В первую очередь страдают водители транспортных средств (ранено 42,5 %, погибло 38,1 %), во вторую – пассажиры (ранено 32,0 %, погибло 40,4 %), в третью – пешеходы (ранено 19,5 %, погибло 19,5 %). По пятницам и в выходные дни показатели дорожно-транспортных происшествий имеют наибольшие значения, что, скорее всего, связано с ростом интенсивности автодорожного движения за счет поездок горожан на природу, дачу, в гости. Крайне травмоопасным являлся период времени с 16.00 до 20.00 ч. Самый травмоопасный месяц года – октябрь (максимальная численность дорожно-транспортных происшествий, погибших, травмируемых, наибольшая тяжесть последствий – 10,40 %).

Ключевые слова

безопасность дорожного движения, транспортный риск, социальный риск, причины автодорожного травматизма, виды дорожно-транспортных происшествий, категории пострадавших, тяжесть последствий

Для цитирования

Асламова В.С. Сопоставительный анализ показателей травматизма на автодорогах Иркутской области в 2022–2023 гг. / В.С. Асламова, А.А. Асламов, А.А. Шуткин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4 (84). С. 54–66. DOI 10.26731/1813-9108.2024.4(84).54-66.

Информация о статье

поступила в редакцию: 07.11.2024 г.; поступила после рецензирования: 17.12.2024 г.; принята к публикации 20.12.2024 г.

Comparative analysis of injury rates on the roads of the Irkutsk region in 2022–2023

V.S. Aslamova¹, A.A. Aslamov², A.A. Shutkin³

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

³Fire and Rescue Service of the Irkutsk region, Irkutsk, the Russian Federation

✉aslamovav@yandex.ru

Abstract

The article compares the values of transport and social risks for Russia, the Irkutsk region and the Krasnoyarsk region, showing that the planned reduction in social risk (4 fatalities in road accidents per 100 thousand people) is unlikely to be achieved. The reduction in social risk in Russia and the Krasnoyarsk region by 1,21 and 1,15 times, respectively, compared to 2018 is encouraging. The road injury rates for the objects under consideration are given, demonstrating its growth. A detailed analysis of the statistics of injury rates on the roads of the Irkutsk region has been carried out, and its causes have been established. 87,93% of road accidents occurred due to violation of traffic rules by drivers, in which 87,67 % of people died and 91,05 % were injured. In this case, drivers of vehicles are the first to suffer (42,5 % were injured, 38,1 % died), the second are passengers (32,0 % were injured, 40,4 % died), while the third are pedestrians (19,5 % were injured, 19,5 % died). On Fridays and weekends, the indicators of road accidents have the highest values, which is most likely due to the increase in the intensity of road traffic due to trips of city residents to nature, the country houses, visiting. The most traumatic period was the time from 16.00 to 20.00. The most traumatic month of the year is October (the maximum number of accidents, fatalities, injuries, severity of consequences is 10,40 %).

Keywords

road safety, transport risk, social risk, causes of road traffic injuries, types of road traffic accidents, categories of victims, severity of consequences

For citation

Aslamova V.S., Aslamov A.A., Shutkin A.A. Sopotavitel'nyi analiz pokazatelei travmatizma na avtodorogakh Irkutskoi oblasti v 2022–2023 gg [Comparative analysis of injury rates on the roads of the Irkutsk region in 2022–2023]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, No. 4(84), pp. 54–66. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.4(84).54-66.

Article Info

Received: November 7, 2024; Revised: December 17, 2024; Accepted: December 20, 2024.

Актуальность исследования

По численности дорожно-транспортных происшествий (ДТП) Россия занимает пятое место в мире [1]. В 2023 г., по данным [2], социальный риск (СР – отношение количества смертей в ДТП к 100 тыс. населения) для РФ по-прежнему составил 12,0, СР гибели женщин – 6,3, СР гибели мужчин – 12,6. В 2023 г. произошел рост показателей ДТП на территории России (в 32 субъектах и регионах), в том числе и в Иркутской области (ИО) и Красноярском крае (КК) [3].

Для эффективной борьбы с автодорожным травматизмом нужно знать причинно-следственные факторы реализации ДТП. Успешная работа по предупреждению ДТП основывается на статистическом анализе его причин и влияющих факторов [4–10], поскольку несомненное достоинство такого анализа – это объективность получаемой информации, что делает ее ценной при выборе перспективных форм воздействия на систему обеспечения безопасности автодорожного

движения (ОБАД) [11]. На основании статистического анализа данных о показателях ДТП корректируются установленные правила дорожного движения (ПДД) и нормативная законодательная база ОБАД [4].

Актуальность исследования вызвана также стремительным ростом количества автомобилей, приходящихся на душу населения. Возрастает при этом интенсивность движения, возникают пробки, растет опасность реализации ДТП [12].

В качестве целевых показателей выполнения федерального проекта «Безопасность дорожного движения» используются СР и транспортный риск (ТР) – отношение количества погибших в ДТП к 10 тыс. транспортных средств. Сопоставление ТР и СР для России, ИО и КК приведены в табл. 1 [3, 13, 14].

Из табл. 1 следует, что в 2022–2023 гг. целевые показатели СР и ТР не достигнуты, выполнены для РФ в 2022 г. лишь ТР, а также СР и ТР в 2023 г. Следует отметить снижение СР по России в 1,2 раза по сравнению с 2019 г. (СР был

Таблица 1. Сопоставление значений транспортного и социального рисков по регионам

Table 1. Comparison of transport and social risk values in regions

Год Year	Регион Region	Значение социального риска Social risk value		Значение транспортного риска Transport risk value	
		Целевое Target	Факт Actual	Целевое Target	Факт Actual
2022	Иркутская область Irkutsk region	11,08	11,94	3,26	3,36
	Красноярский край Krasnoyarsk region	10,29	10,65	2,79	2,82
	РФ Russian Federation	Не более 9,59	9,68	Не более 2,42	2,34
2023	Иркутская область Irkutsk region	11,65	12,83	3,26	3,59
	Красноярский край Krasnoyarsk region	9,80	10,47	–	–
	РФ Russian Federation	9,94	9,91	2,40	2,36

равен 12) [15]. Однако установленное транспортной стратегией РФ [16] целевое значение $CP = 4$ к 2030 г. вряд ли будет достигнуто.

Целью данной работы является системный анализ статистических показателей ДТП [17], выявление существенных причин их реализации, обзор эффективных способов повышения ОБАД.

Сравнительный анализ статистических показателей дорожно-транспортных происшествий РФ, Красноярского края и Иркутской области

Известно, что количественный анализ статистики автодорожного травматизма – основа успеха работы по повышению безопасности автодорожного движения. Учет динамики из-

менения показателей ДТП позволяет выбирать профилактические мероприятия и повышать их эффективность [4, 5, 12, 18].

Статистические данные о ДТП на автодорогах РФ, ИО и КК за 2023 г. [3] приведенные в табл. 2 (АППГ – аналогичный показатель предыдущего года, показывающий относительное изменение текущего показателя), анализировались в MS Excel. Вычислялась также тяжесть последствий ДТП k (%) как отношение численности погибших к 100 пострадавшим (суммарное число раненых и погибших) [19]. Протяженность автодорог R (тыс. км) общего пользования и их удельный вес (УВ) с твердым покрытием (%) выбраны из [20].

Данные табл. 2 свидетельствуют о значительном увеличении практически всех показате-

Таблица 2. Итоговые показатели дорожно-транспортных происшествий в 2023 г. по регионам

Table 2. Final road accident figures in 2023 in regions

Наименование Name	РФ Russian Federation		Иркутская область Irkutsk region		Красноярский край Krasnoyarsk region	
	Значение Value	АППГ, % similar indicator of the previous year, %	Значение Value	АППГ, % similar indica- tor of the pre- vious year, %	Значение Value	АППГ, % similar indica- tor of the pre- vious year, %
Количество населения, тыс. чел. Population, thousand people	146 447,4	6,11	2 334,4	–0,96	2 845,5	–0,13
Протяженность автодорог R , тыс. км Length of highways R , thousand km	1 579,3	–	31,6	–	32,3	–
Удельный вес автодорог с твердым покрытием, % Proportion of highways with hard surface, %	71,4	–	81	–	85,5	–
Количество дорожно-транспортных происшествий Number of road accidents	132 466	4,5	2 304	4,5	2 959	9,3
Погибшие Died	14 504	2,3	300	2,3	298	–1,7
Раненые Injured	166 500	4,3	2 917	4,3	3 604	7,5
Тяжесть последствий k , % Severity of consequences k , %	8,01	–	9,32	–	7,64	–

телей ДТП в РФ, ИО и КК (снизилось лишь количество погибших в КК), причем по численности ДТП и раненых лидирует КК, а по тяжести ДТП – ИО.

Динамика показателей дорожно-транспортных происшествий в Иркутской области

На рис. 1 представлена гистограмма распределения годовых показателей ДТП по дням недели.

Видно, что в России по пятницам и в выходные дни показатели ДТП имеют наибольшие значения, что, скорее всего, связано с ростом интенсивности автодорожного движения за счет поездок горожан на природу, дачу, в гости.

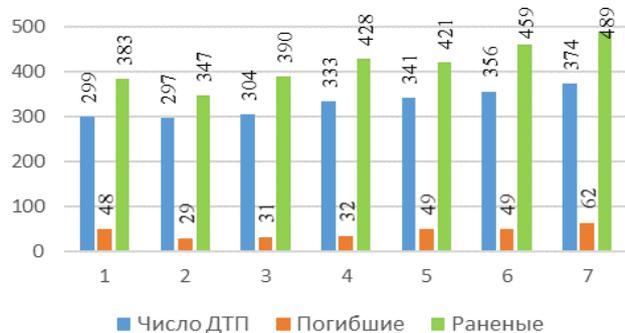


Рис. 1. Гистограмма распределения показателей дорожно-транспортных происшествий по дням недели

Fig. 1. Histogram of the distribution of traffic accidents rates by days of the week

Максимальные значения показателей аварийности приходятся на воскресенье, когда реализуется 16,23 % от общего числа ДТП с наибольшей тяжестью последствий (11,25 %), в

которых погибло 20,67 % и ранено 16,76 % чел. Наименее опасным днем недели является вторник. Максимальное количество ДТП и число раненых пришлось на четверг (104 случая и 97 чел.) и пятницу (102 случая и 94 чел.).

На рис. 2 показано распределение показателей ДТП по времени реализации, причем в темное время суток, как и по России (32,4 % [3]), в ИО происходит менее трети ДТП (31,86 %), в которых погибло – 46,0 % людей, было ранено 30,44 %. После рабочего дня с 17.00 до 20.00 ч показатели ДТП имеют наибольшие значения (см. рис. 2). Наиболее травмоопасным являлся период времени с 16.00 до 20.00 ч, за который произошло 26 % ДТП, пострадали 44 % чел., из них погибло 19 % чел. Наибольшая тяжесть последствий у ДТП, которые были совершены в периоды времени: 6.00–7.00 ($k = 16,67 %$) и 23.00–24.00 ($k = 15,26 %$).

На рис. 3 представлена гистограмма распределения показателей аварийности по месяцам.

Самым травмоопасным месяцем года стал октябрь (максимальная численность ДТП, погибших, травмируемых $k = 10,40 %$). В сентябре – максимальное значение тяжести последствий ДТП $k = 11,40 %$. Минимальная численность ДТП, раненых, погибших и наименьшая тяжесть последствий ($k = 5,20 %$) зарегистрированы в марте. Небольшие значения показателей аварийности отмечены с января по апрель, хотя в зимнее время на автодорогах неудовлетворительные погодные условия.

Из-за нарушения ПДД водителями транспортных средств (ТС) произошло 87,93 % ДТП (2 026 случаев), в которых погибло 87,67 % участников (263 чел.) и ранено 91,05 % (2 656

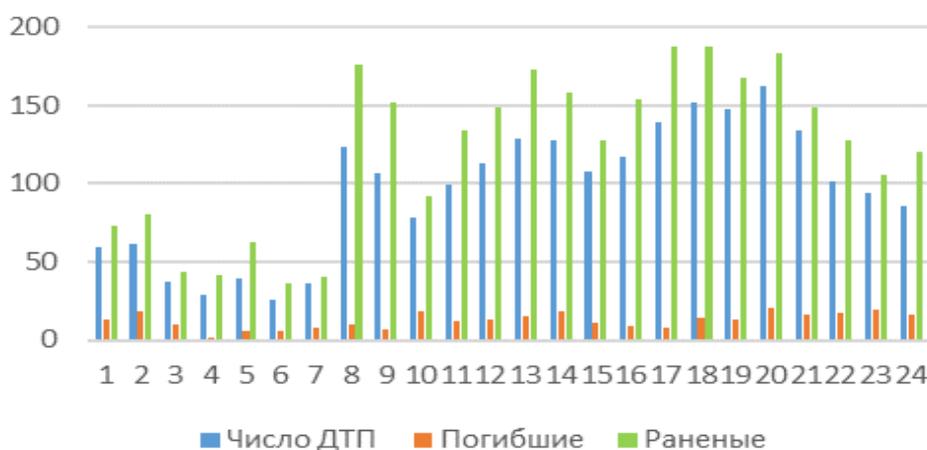


Рис. 2. Распределение показателей дорожно-транспортных происшествий по времени его реализации

Fig. 2. Distribution of road traffic accident indicators by the time of its occurrence

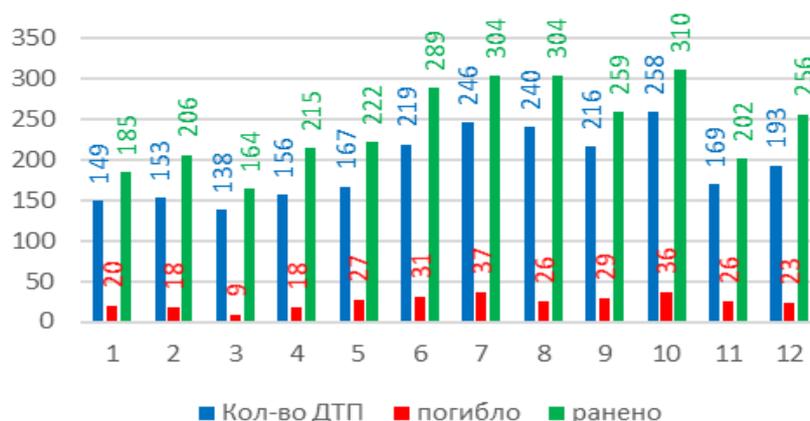


Рис. 3. Распределение показателей дорожно-транспортных происшествий по месяцам

Fig. 3. Distribution of road accident rates by month

чел.). На рис. 4 показано распределение показателей ДТП по категориям пострадавших. Было два ДТП с особо тяжкими последствиями ($k = 26,32\%$, по погибшим АППГ = 400 %).

Из рис. 4 следует, что при ДТП прежде всего страдают водители ТС, что также подтверждается данными табл. 3.

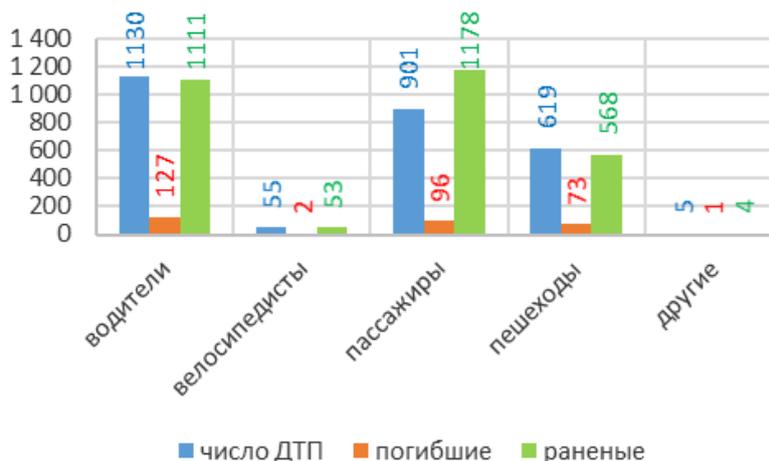


Рис. 4. Распределение показателей дорожно-транспортных происшествий по категориям пострадавших из-за нарушения правил дорожного движения водителями транспортных средств

Fig. 4. Distribution of road traffic accidents by categories of victims due to violation of road traffic regulations by drivers of vehicles

Таблица 3. Градация показателей дорожно-транспортных происшествий по категориям пострадавших

Table 3. Grading of road accident indicators by categories of victims

Категория пострадавших Category of victims	Число дорожно-транспортных происшествий, % Number of accidents, %	Погибшие, % Died, %	Раненые, % Injured, %
Водители Drivers	49,50	42,33	38,13
Пассажиры Passengers	39,11	32,00	40,43
Пешеходы Pedestrians	26,87	19,47	19,47
Велосипедисты Cyclists	2,39	0,67	1,82
Другие участники Others	0,22	0,33	0,14

По сравнению с 2022 г. существенно выросла численность ДТП (АППГ = 22,2 %) и раненых велосипедистов (АППГ = 32,5 %) и численность ДТП (АППГ = 8,2 %), погибших (АППГ = 15,7 %) и раненых пассажиров (АППГ = 8,6 %). Для погибших пешеходов АППГ = 21,7 %.

Следует отметить, что в момент реализации ДТП у 33,01 % водителей были зафиксированы признаки опьянения, из них 99,28 % водителей были пьяны, под наркотическим воздействием находилось 8,04 % водителей, а 11,26 % водителей отказались от прохождения медицинского освидетельствования. Количество таких ДТП в 2023 г. – 16,19 % (АППГ = –3,9 %).

Управление ТС водителем, находящимся в состоянии опьянения или под действием наркотических средств, Всемирная организация здравоохранения относит к одному из главных факторов риска реализации ДТП и именно этим объясняет высокий уровень СР в России, США, Бразилии и других странах [2]. Этому мнению придерживаются и многие российские исследователи [21–23] и др.

На рис. 5 показана гистограмма показателей ДТП, произошедших из-за нарушения ПДД водителями различных ТС.

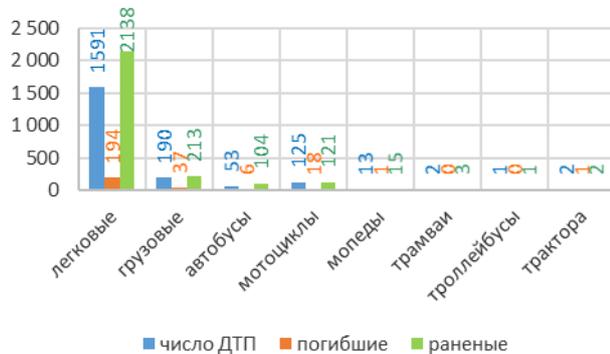


Рис. 5. Гистограмма показателей дорожно-транспортных происшествий, произошедших из-за нарушения правил дорожного движения водителями различных транспортных средств

Fig. 5. Histogram of indicators of road accidents that occurred due to violation of traffic rules by drivers of various vehicles

Видно, что водители легковых ТС нарушают ПДД чаще, чем водители грузовых ТС в 8,37 раза, чем водители автобусов в 30,2 раза, чем мотоциклисты в 12,73 раза. Это связано напрямую с численностью зарегистрированных видов ТС [13].

На рис. 6 показана зависимость показателей ДТП от возраста водителя при выезде ТС на полосу встречного движения.

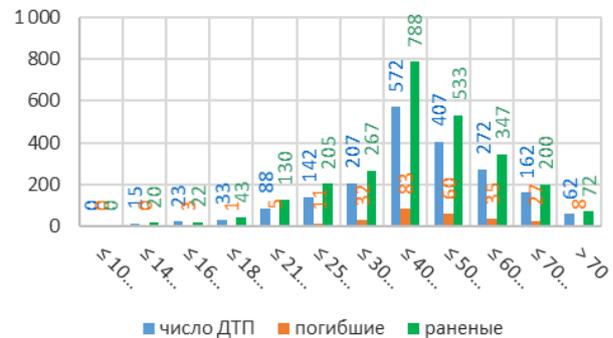


Рис. 6. Зависимость показателей дорожно-транспортных происшествий от возраста водителя при выезде транспортного средства на полосу встречного движения

Fig. 6. Dependence of road traffic accident indicators on the driver's age when a vehicle drives into the oncoming traffic lane

Из рис. 6 видно, что максимальные последствия ($k = 9,53\%$) такого выезда соответствует возрасту водителей от 30 до 40 лет. Процент ДТП с выездом на встречную полосу движения – 8,34 (АППГ = –11,1 %).

На рис. 7 показана зависимость показателей ДТП от водительского стажа при выезде ТС на встречную полосу движения.

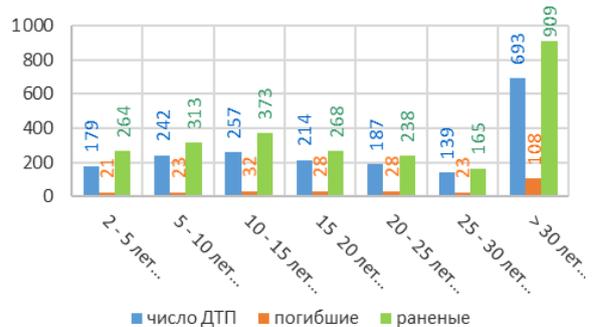


Рис. 7. Зависимость показателей дорожно-транспортных происшествий от водительского стажа при выезде транспортного средства на встречную полосу движения

Fig. 7. Dependence of road traffic accident indicators on driving experience when a vehicle enters the oncoming traffic lane

Как следует из рис. 7 чаще всего (в 32,4 % случаев) нарушают ПДД водители ТС с большим стажем управления, превышающем 30 лет. Это можно объяснить снижением с возрастом водителя ТС концентрации внимания, повыше-

нием утомляемости и замедлением реакции на автодорожную ситуацию, а также завышенной оценкой своих профессиональных навыков.

На рис. 8 представлены случаи ДТП при участии пешехода.

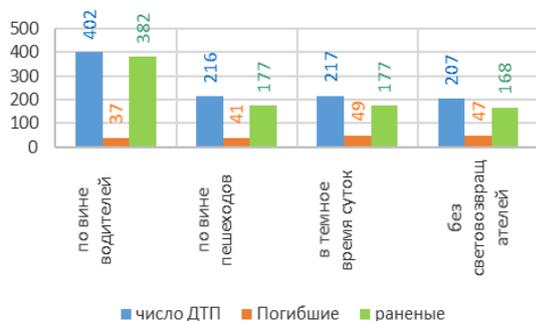


Рис. 8. Реализация дорожно-транспортных происшествий при участии пешехода
Fig. 8. Implementation of traffic accidents involving pedestrians

В 96,12 % ДТП пострадали пешеходы при наезде на них ТС, причем в 36,47 % ДТП произошло в темное время суток, при этом в 95,39 % случаев на одежде пешеходов отсутствовали световозвращающие элементы. Винаваты в наезде водители в 67,56 % случаев, пешеходы – в 36,30 % ДТП. В 79,16 % ДТП наезд ТС на пешехода произошел на первой полосе движения, в 13,78 % – на второй, в 2,02 % – на третьей, в 1,51 % – на четвертой.

В 33,13 % ДТП наезд ТС на пешехода был совершен на пешеходном переходе, из них в темное время суток 24,15 % ДТП, на нерегулируемых переходах – 86,02 % ДТП. По вине водителя произошло 93,04 % ДТП, из них 91,04 % в ночное время, по вине пешехода – 5,93 %.

На рис. 9 приведена классификация по видам ДТП.

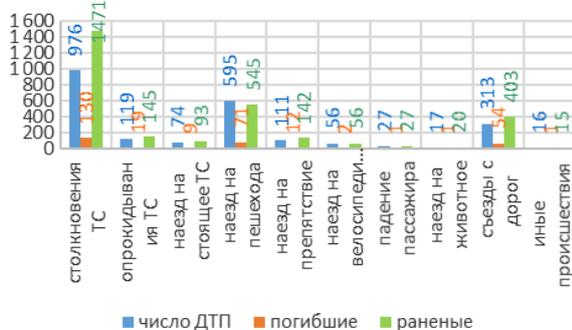


Рис. 9. Классификация по видам дорожно-транспортных происшествий
Fig. 9. Classification by types of road accidents

Иные происшествия – это наезд на дорожно-транспортного рабочего, сотрудника Госавтоинспекции и т.д. Из рис. 9 следует, что больше всего пострадавших при столкновении ТС. В табл. 4 приведена градация видов ДТП с указанием процента их реализации в 2023 и 2022 гг. [13], указана также тяжесть последствий ДТП.

Самый распространенный вид ДТП – столкновение ТС. Количество случаев столкновения ТС выросло в 1,067 раза, опрокидывания ТС – в 2,228 раз, иных происшествий – в 18,365 раз по сравнению с 2022 г. Наиболее тяжелые последствия ДТП при опрокидывании ТС, съезде ТС с дороги и наезде на пешехода.

На рис. 10 представлены показатели ДТП по местам их реализации.

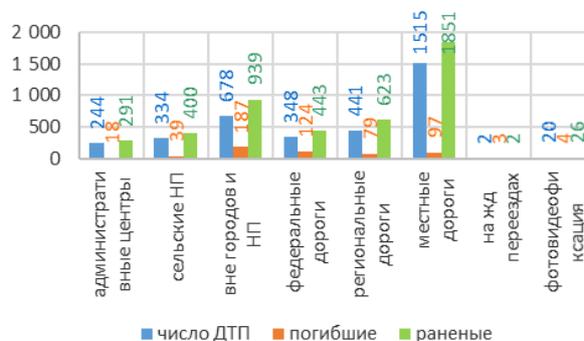


Рис. 10. Показатели дорожно-транспортных происшествий в местах их реализации
Fig. 10. Road accident rates in the places where they occur

Видно, что наибольшее количество ДТП и раненых на автодорогах местного значения, а больше всего людей погибло вне населенных пунктов и городов.

При перевозке пассажиров и багажа автомобилями произошло 105 ДТП (АППГ = – 6,3 %), в которых погибло 14 чел. (АППГ = 40 %), из них 3 пассажира, ранено 169 чел. (АППГ = –11,1 %) из них 87 пассажиров. При выполнении регулярных перевозок произошло 75 ДТП (АППГ = –10,7 %, погибло 3 чел. и ранено 126 чел.), из них в городском сообщении – 65 ДТП (АППГ = 6,5 %, погиб 1 и ранено 108 чел.). При перевозке по заказам произошло 6 ДТП (АППГ = 25 %, погибло 5 чел. и ранено 3 чел.). С участием такси произошло 10 ДТП (АППГ = 42,9 %, раненых 10 чел.), трамваев – 11 ДТП (АППГ = 37,5 %, раненых 11 чел.), троллейбусов 3 ДТП (АППГ = – 66,7 %, раненых 3 чел.).

Причины автодорожного травматизма в ИО в 2023 г., опубликованные Госавтоинспекцией [24], представлены в табл. 5, полученные при обработке данных статистики [17] – в табл. 6. Кроме указанных причин, на численность ДТП влияют недостаточная освещен-

ность дорог в темное время суток (32,4 % от общего числа ДТП, погибших 43,6 % от общего количества) [3], плохие погодные условия, большое количество нерегулируемых пешеходных переходов и др.

Таблица 5. Причины смертельных дорожно-транспортных происшествий на автодорогах Иркутской области в 2023 г. (по данным Государственной инспекции безопасности дорожного движения)

Table 5. Causes of fatal road accidents on the roads of the Irkutsk region in 2023 (according to the State Traffic Safety Inspectorate)

№	Причина Cause	Количество смертельных дорожно-транспортных происшествий Number of fatal road accidents
1	Несоответствие скорости транспортного средства дорожным условиям Inconsistency of vehicle speed with road conditions	64
2	Нарушение правил местоположения транспортного средства на дороге Violation of vehicle positioning rules on the road	55
3	Выезд транспортного средства на встречную полосу Vehicle driving into oncoming lane	36
4	Нарушение приоритета пешехода на переходе Violation of pedestrian priority at a crossing	13
5	Нарушение очередности проезда Violation of the order of passage	12
6	Неверный выбор дистанции между транспортными средствами Incorrect choice of distance between vehicles	12
7	Темное время суток Dark time of day	Каждое 5 Each 5th
8	Наркотическое или алкогольное опьянение водителя Drug or alcohol intoxication of the driver	Каждое 3 Each 3d

Таблица 6. Причины реализации дорожно-транспортных происшествий на автодорогах Иркутской области в 2023 г.

Table 6. Reasons for the implementation of road accidents on the roads of the Irkutsk region in 2023

№	Причина Cause	ДТП, %
1	Нарушение правил дорожного движения водителями Violation of traffic rules by drivers	87,93
2	Водители транспортных средств в состоянии наркотического или алкогольного опьянения Drivers of vehicles under the influence of drugs or alcohol	69,05
3	Перевозка водителем детей без ремней безопасности и удерживающих устройств Transportation of children by the driver without seat belts and restraints	10,14
4	Выезд транспортного средства на встречную полосу Driving a vehicle into the oncoming lane	8,34
5	Нарушение приоритета пешехода на переходе Violation of pedestrian priority at a crossing	17,45
6	Из них в темное время суток Including at night	9,42
7	Одежда пешехода без световозвращающих элементов Pedestrian clothing without reflective elements	8,98
8	Неудовлетворительные дорожные условия федеральных автодорог Poor road conditions of federal highways	8,91
9	Неудовлетворительные дорожные условия региональных автодорог Poor road conditions of regional highways	55,78
10	Неудовлетворительные дорожные условия местных автодорог Poor road conditions of local highways	68,92
11	Фото- и видеозапись нарушений правил дорожного движения Photo and video recording of traffic violations	1,23
12	Техническая неисправность транспортного средства Technical malfunction of a vehicle	0,22

Детский автодорожный травматизм и его профилактика

Вследствие значительного увеличения численности ТС и интенсивности дорожного движения в России, ИО и мире проблема детского автодорожного травматизма (ДАТ) злободневна и требует особого внимания [6, 7, 10, 25, 26]. На рис. 11 представлены показатели ДАТ в ИО.

В 2023 г. в ИО существенно выросла численность ДТП с участием детей (ДТП – 296, АППГ = 4,6 %) и подростков (ДТП – 20, АППГ = 66,7 %). Видно, что наибольшая численность ДТП, раненых и погибших среди де-

тей-пассажиров, далее следуют показатели ДТП с детьми-пешеходами. В табл. 7 указаны причины ДАТ.

Указанные причины можно объяснить низким уровнем культуры автодорожной безопасности и дисциплины водителей, пассажиров или пешеходов, применением адаптера «ФЭСТ» по причине его дешевизны вместо детского кресла. Известно, что адаптер ориентирован на детей весом 15–36 кг и не обеспечивает ограничение подвижности детского тела при столкновении или резком торможении ТС. Поэтому они теперь запрещены не только в стране, их производящей, но и в России [27]. Дети, копируя по-

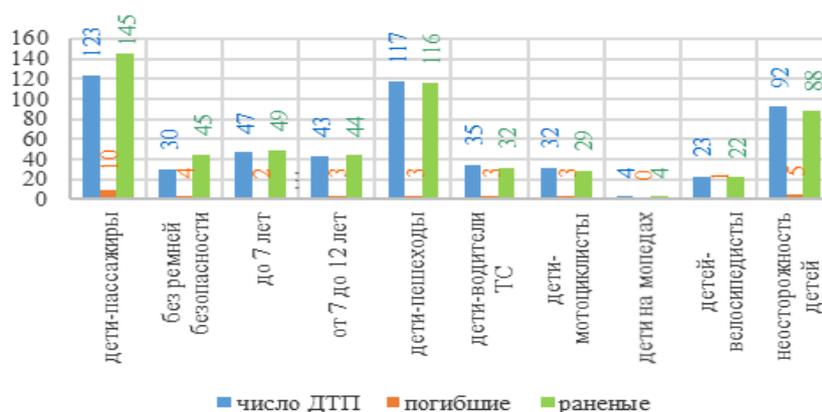


Рис. 11. Показатели детского автодорожного травматизма

Fig. 11. Child road traffic injury rates

Таблица 7. Причины детского автодорожного травматизма

Table 7. Causes of Childhood Road Traffic Injuries

№	Причина Cause	%
Дети до 16 лет Children under 16		
1	Нарушение водителем правил дорожного движения Violation of traffic rules by the driver	79,39
2	По неосторожности детей Due to carelessness of children	31,08
3	Перевозка детей-пассажиров без удерживающих устройств и кресел Transportation of child passengers without restraining devices and seats	24,39
4	Наезд транспортного средства на детей-пешеходов Vehicle hitting a child pedestrians	15,34
5	Из них в темное время суток без световозвращателей на одежде Including at night without reflectors on clothing	19,57
6	Дети-водители механических транспортных средств Child drivers of motor vehicles	11,82
7	Дети-велосипедисты Child cyclists	7,77
Подростки до 18 лет Teenagers under 18 years of age		
8	Нарушение водителем правил дорожного движения Violation of traffic rules by the driver	81,94

ведение взрослых, часто перебегают дорогу на красный сигнал светофора. Часто отсутствует родительский контроль за поведением детей на улице, имеются недостатки в оборудовании пешеходных переходов, что провоцирует рост ДТП, отсутствует специальное единое учебное пособие и методические материалы для обучения детей ПДД.

Рассмотрим кратко организацию профилактической работы в ИО. Совместно с педагогами школ, управляющими и кикшеринговыми компаниями, областным Союзом отцов организована акция «Безопасный двор», направленная на информирование детей о том, что на электро-самокатах нельзя выезжать на проезжую часть, а управлять ими могут подростки с 14 лет и только под присмотром взрослого. Успешно функционирует 626 отрядов юных инспекторов движения, включающих около 10 тыс. детей. Существует мобильная «Лаборатория безопасности», оперативно выезжающая в учреждение, в котором произошло ДТП. Ситуация анализируется и проводится расследование, почему недоучили ребенка. Уже 40 лет проводится региональный смотр-фестиваль «Безопасное колесо», победителей которого отправляют на федеральный конкурс. Ежегодно проводятся акции: «Безопасная дорога в школу», «Засветись» (об использовании световозвращающих элементов на одежде), «Мы – за безопасность!», семейный конкурс по безопасности дорожного движения и т.п. Это способствует формированию у подростков и детей осознанного поведения на автодорогах и культуры транспортной безопасности [27, 28].

Заключение

Анализируя результаты травматизма на автодорогах ИО для снижения автодорожного

травматизма, повышения уровня дисциплины и культуры поведения всех участников автодорожного движения можно предложить следующие первоочередные меры:

1. Разработать и опубликовать для детей единое специальное учебное пособие по ПДД и культуре транспортной безопасности с учетом их поведенческой психологии.

2. Проводить викторины, игры по изучению ПДД среди студентов, школьников, детей, других категорий населения.

3. Увеличить штрафы за перевозку детей без удерживающих устройств и кресел, за эксплуатацию неисправного ТС, за нарушения ПДД.

4. За управление ТС в пьяном или в наркотическом состоянии ужесточить наказание водителей вплоть до заключения под стражу как это принято в Японии.

5. Каждое новое ТС оснастить:

– датчиком, который автоматически заблокирует ТС, если у водителя имеются следы алкоголя;

– видеодатчиком сонливости, который будет натягивать ремень безопасности или производить громкие звуки, чтобы привлечь внимания водителя;

– системой, которая будет исключать прямое столкновение ТС путем регистрации расстояния между машинами и автоматического выбора необходимой скорости движения.

6. Рекомендовать в затемненных условиях применение людьми съемных или стационарных светоотражающих элементов.

7. Усилить пропаганду правильного поведения на дороге в СМИ, в социальной рекламе, в Интернет-среде [29–32].

Список литературы

1. Top 10 Countries with the Most Traffic Accidents // GeeksforGeeks : сайт. URL : <https://www.geeksforgeeks.org/countries-with-the-most-traffic-accidents/> (Дата обращения 20.10.2024).
2. Road Deaths by Country 2024 // World population review : site. URL : <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/road-deaths-by-country> (Дата обращения 20.10.2024).
3. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации в 2023 году. Информационно-аналитический обзор // Научный центр безопасности дорожного движения : сайт. URL : <https://media.mvd.ru/files/embed/5767457> (Дата обращения 20.10.2024).
4. Сравнительный анализ причин ДТП в трех странах: Германии, США и России / Н.Н. Панов, Э.С. Цыганков, В.Н. Зудин и др. // Экстремальная деятельность человека. 2016. № 2 (39). С. 19–24.
5. Галиулина М.Ф., Рабочий С.А. Анализ причин ДТП на участке городской дороги // Организация и безопасность дорожного движения : материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ., посвящ. 85-летию со дня рождения д. т. н., проф. Л.Г. Резника. Тюмень, 2016. С. 107–112.
6. Асламова В.С., Минко А.А., Асламов А.А. Прогнозные модели травматизма с участием подростков на автомобильных дорогах общего пользования // Математические методы в технике и технологиях. 2021. № 1. С. 174–177.
7. Минко А.А., Асламова В.С. Сравнительный анализ травматизма с участием детей на автомобильных дорогах

России // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 417–421. URL: https://mnv.irkups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/minko_aslamova.pdf (Дата обращения 20.10.2024).

8. Асламова В.С., Минко А.А., Асламов А.А. Регрессионные модели травматизма на автомобильных дорогах России // Образование – Наука – Производство : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2020. Т. 2. С. 109–113.

9. Асламова В.С., Кузнецова П.А., Асламов А.А. Сравнительный анализ дорожно-транспортных происшествий в Иркутской области и России // Вестн. Ангар. гос. техн. ун-та. 2021. № 15. С. 127–130.

10. Летагина Е.Н., Кучеров А.С. Дорожно-транспортная безопасность на дорогах России // Теория и практика мировой науки. 2020. № 12. С. 30–34.

11. Кравченко П.А., Жанказиев С.В., Олещенко Е.М. Терминологический и алгоритмический аспекты в проблеме обеспечения нулевой смертности на дорогах России // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2020. № 2 (87). С. 3–6.

12. Вербейников С.Э. Обеспечение безопасности дорожного движения в транспортной системе города // Организация и безопасность дорожного движения : материалы X Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию со дня рождения д. т. н., проф. Л.Г. Резника. Тюмень, 2017. Т. 1. С. 29–32.

13. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 2022 год. Информационно-аналитический обзор. М. : ФКУ «НЦ БДД МВД России», 2023. 150. URL : <https://media.mvd.ru/files/embed/4761994> (Дата обращения 20.10.2024).

14. Об утверждении Программы комплексного развития транспортной инфраструктуры Красноярской городской агломерации : постановление Правительства Красноярского края от № 336-п 27.04.2023 // Официальный интернет-портал правовой информации : сайт. URL : <http://publication.pravo.gov.ru/document/2400202305050003> (Дата обращения 30.10.2024).

15. List of countries by traffic-related death rate // Wikipedia : сайт. URL : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_traffic-related_death_rate (Дата обращения 30.10.2024).

16. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.

17. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения // Госавтоинспекция : офиц. сайт М-ва внутр. дел Рос. Федерации. URL : <http://stat.gibdd.ru/> (Дата обращения 05.11.2024).

18. Аземша С.А., Карасевич С. Н. Учет динамики аварийности при разработке мероприятий по повышению безопасности дорожного движения // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XII Национ. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Тюмень, 2019. Т. 2. С. 8–14.

19. Тяжесть последствий ДТП определение // Правовой ресурс автоюрист : сайт. URL : <https://prava63.ru/dtp/tjazhest-prosledstvij-dtp-opredelenie/> (Дата обращения 31.10.2024).

20. Протяженность автомобильных дорог общего пользования по субъектам РФ // Федеральная служба государственной статистики : сайт. URL : https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Prot_avtodor_obsch_2023.xlsx (Дата обращения 28.10.2024).

21. Баканов К.С., Бурцев А.А. Предупреждение фактов управления транспортным средством в состоянии опьянения на этапах получения, приостановления, прекращения и возобновления права на управление транспортным средством. М. : НЦ БДД МВД России, 2021. 149 с.

22. Бурцев А.А. Анализ некоторых нормативных правовых актов и проектов, направленных на снижение частоты случаев управления транспортными средствами в состоянии опьянения в Российской Федерации // Наркология. 2019. Т. 18. № 11. С. 11–19.

23. Конорев Д.В., Сафонова Н.Л. Основные поведенческие реакции водителя, приводящие к дорожно-транспортным происшествиям // Пожарная и аварийная безопасность : сб. материалов XVI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. проведению в РФ Года науки и технологий в 2021 году и 55-летию учеб. заведения. Иваново, 2021. С. 543–546.

24. Крупнейшие аварии в Иркутской области за 2023 год // Weacom.ru : сайт. URL : <https://www.weacom.ru/articles/info/218588> (Дата обращения 21.10.2024).

25. Малолеткина Н.С., Королева К.А. Детский дорожно-транспортный травматизм: причины в России и зарубежный опыт профилактики // Уголовно-исполнительное право. 2022. Т. 17. № 1. С. 85–90.

26. В России выросло количество ДТП с участием детей // Известия : электрон. газ. 2024. 19 янв. URL : <https://iz.ru/1636718/2024-01-19/v-rossii-vyroslo-kolichestvo-dtp-s-uchastiem-detei> (Дата обращения 28.10.2024).

27. ГИБДД: адаптеры «ФЭСТ» вне закона! // Drive2.ru : сайт. URL : <https://www.drive2.ru/b/2215282/?ysclid=m312jkb6bin697190034> (Дата обращения 28.10.2024).

28. О безопасности детей на дороге и ответственности участников дорожного движения – эксперты «Областной» // Областная : электрон. газ. 2023. 24 авг. URL : <https://www.ogirk.ru/2023/08/24/o-bezopasnosti-detej-na-doroge-i-otvetstvennosti-uchastnikov-dorozhnogo-dvizhenija-jeksperty-oblastnoj/> (Дата обращения 28.10.2024).

29. План работы МБУ ДО ДДТ по профилактике детского дорожно-транспортного травматизма на 2022 год // 782329.selcdn.ru : сайт. URL : <https://782329.selcdn.ru/leonardo/uploadsForSiteId/200922/content/85dc3c34-3aa2-4c5f-bd42-39c5c936f996.pdf> (Дата обращения 29.10.2024).

30. Квашиш В.Е. К проблеме культуры противодействия преступности // Вестн. Краснодар. ун-та МВД России. 2016. № 2 (32). С. 13–20.

31. Малешина Л.М., Хорошева А.В. Внедрение интеллектуальных транспортных технологий как инструмент повышения безопасности транспортной среды // Транспортное право и безопасность. 2022. № 2 (42). С. 164–172.

32. Safe-Driving Technologies Available for Cars That Help Prevent Accidents in 2024 // Arash Law : site. URL : <https://arashlaw.com/20-safe-driving-technologies-available-for-cars-that-help-prevent-accidents> (Дата обращения 28.10.2024).

References

1. Top 10 Countries with the Most Traffic Accidents (Last Updated 28 Mar, 2024). Available at: <https://www.geeksforgeeks.org/countries-with-the-most-traffic-accidents/> (Accessed October 20, 2024).
2. Road Deaths by Country 2024. Available at: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/road-deaths-by-country> (Accessed October 20, 2024).
3. Dorozhno-transportnaya avariinost' v Rossiiskoi Federatsii v 2023 godu. Informatsionno-analiticheskii obzor (Elektronnyi resurs) [Road traffic accidents in the Russian Federation in 2023. Information and analytical review (Electronic resource)]. Available at: <https://media.mvd.ru/files/embed/5767457> (Accessed October 20, 2024).
4. Panov N.N., Tsygankov E.S., Zudin V.N., Britvina V.V., Konyukhov V.G. Sravnitel'nyi analiz prichin DTP v trekh strankah: Germanii, SSHA i Rossii [Comparative analysis of the causes of road accidents in three countries: Germany, the USA and Russia]. *Ekstremal'naya deyatel'nost' cheloveka* [Extreme human activity], 2016, no 2 (39), pp. 19–24.
5. Galiulina M.F., Rabochii S.A. Analiz prichin DTP na uchastke gorodskoi dorogi [Analysis of the causes of road accidents on a section of a city road]. *Materialy IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem), posvyashchennoi pamyati professora, doktora tekhnicheskikh nauk Reznika L.G. «Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya»* [Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical conference (with international participation) dedicated to the memory of Full Professor, Doctor of Engineering Science Reznik L.G. «Organization and safety of road traffic»]. Tyumen', 2016, pp. 107–112.
6. Aslamova V.S., Minko A.A., Aslamov A.A. Prognoznye modeli travmatizma s uchastiem podrostkov na avtomobil'nykh dorogakh obshchego pol'zovaniya [Predictive models of injuries involving adolescents on public roads]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh* [Mathematical methods in engineering and technology], 2021, no 1, pp. 174–177.
7. Minko A.A., Aslamova V.S. Sravnitel'nyi analiz travmatizma s uchastiem detei na avtomobil'nykh dorogakh Rossii [Comparative analysis of injuries involving children on the roads of Russia]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2021, no 2 (12), pp. 417–421.
8. Aslamova V.S., Minko A.A., Aslamov A.A. Regressionnye modeli travmatizma na avtomobil'nykh dorogakh Rossii [Regression Models of Injury on Highways in Russia]. *Materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – nauka – proizvodstvo»* [Proceedings of the IV All-Russian scientific-practical conference «Education – science – production»]. Chita, 2020, vol. 2, pp. 109–113.
9. Aslamova V.S., Kuznetsova P.A., Aslamov A.A. Sravnitel'nyi analiz dorozhno-transportnykh proisshествii v Irkutskoi oblasti i Rossii [Comparative analysis of road traffic accidents in the Irkutsk region and Russia]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Angarsk State Technical University], 2021, no 15, pp. 127–130.
10. Letyagina E.N., Kucherov A.S. Dorozhno-transportnaya bezopasnost' na dorogakh Rossii [Road transport safety on the roads of Russia]. *Teoriya i praktika mirovoi nauki* [Theory and practice of world science], 2020, no 12, pp. 30–34.
11. Kravchenko P.A., Zhankaziev S.V., Oleshchenko E.M. Terminologicheskii i algoritmicheskii aspekty v probleme obespecheniya nulevoi smertnosti na dorogakh Rossii [Terminological and algorithmic aspects in the problem of ensuring zero mortality on the roads of Russia]. *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, Economics], 2020, no 2 (87), pp. 3–6.
12. Verbeinikov S.E. Obespechenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v transportnoi sisteme goroda [Ensuring road safety in the city transport system]. *Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 85-letiyu so dnya rozhdeniya d. t. n., professora L.G. Reznika «Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya»* [Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th anniversary of the birth of Doctor of Engineering Science, Full Professor L.G. Reznik «Organization and safety of road traffic»]. Tyumen', 2017, Vol. 1, pp. 29–32.
13. Dorozhno-transportnaya avariinost' v Rossiiskoi Federatsii v 2022 godu. Informatsionno-analiticheskii obzor (Elektronnyi resurs) [Road traffic accidents in the Russian Federation in 2022. Information and analytical review (Electronic resource)]. Available at: <https://media.mvd.ru/files/embed/4761994> (Accessed October 20, 2024).
14. Postanovlenie Pravitel'stva Krasnoyarskogo kraia ot № 336-p 27.04.2023 «Ob utverzhdenii Programmy kompleksnogo razvitiya transportnoi infrastruktury Krasnoyarskoi gorodskoi aglomeratsii» (Elektronnyi resurs) [Resolution of the Government of the Krasnoyarsk Region No 336-p dated April 27, 2023 «On approval of the Program for the integrated development of the transport infrastructure of the Krasnoyarsk urban agglomeration» (Electronic resource)]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/document/2400202305050003> (Accessed October 30, 2024).
15. List of countries by traffic-related death rate // Wikipedia : сайт. URL : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_traffic-related_death_rate (Accessed October 30, 2024).
16. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»].
17. Svedeniya o pokazatelyakh sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya (Elektronnyi resurs) [Information about road safety indicators: website of the State Traffic Inspectorate (Electronic Recourse)]. Available at: <http://stat.gibdd.ru/> (Accessed November 5, 2024).
18. Azemsha S.A., Karasevich S.N. Uchet dinamiki avariynosti pri razrabotke meropriyatiy po povysheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Taking into account the dynamics of accidents when developing measures to improve road safety]. *Materialy XII Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya». (V 2-kh tomakh)* [Proceedings of the XII National scientific and practical conference with international participation «Organization and road safety» (In 2 volumes)]. Tyumen', 2019, Vol. 2, pp. 8–14.

19. Tyazhest' posledstviy DTP opredelenie (Elektronnyi resurs) [Severity of the consequences of an accident definition (Electronic resource)]. Available at: <https://prava63.ru/dtp/tjazhest-posledstvij-dtp-opredelenie/> (Accessed October 31, 2024).

20. Protyazhennost' avtomobil'nykh dorog obshchego pol'zovaniya po sub'yektam RF (Elektronnyi resurs) [Length of public roads by constituent entities of the Russian Federation (Electronic resource)]. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Prot_avtodor_obsch_2023.xlsx (Accessed October 28, 2024).

21. Bakanov K.S., Burtsev A.A. Preduprezhdenie faktov upravleniya transportnym sredstvom v sostoyanii op'yaniya na etapakh polucheniya, priostanovleniya, prekrashcheniya i vozobnovleniya prava na upravlenie transportnym sredstvom [Prevention of facts of driving a vehicle while intoxicated at the stages of obtaining, suspension, termination and renewal of the right to drive a vehicle: monograph]. Moscow: NTs BDD MVD Rossii Publ., 2021. 149 p.

22. Burtsev A.A. Analiz nekotorykh normativnykh pravovykh aktov i proektov, napravlenykh na snizhenie chastoty sluchaev upravleniya transportnymi sredstvami v sostoyanii op'yaniya v Rossiiskoi Federatsii [Analysis of some regulatory legal acts and projects aimed at reducing the incidence of drunk driving in the Russian Federation]. *Narkologiya* [Narcology], 2019, Vol. 18, no 11, pp. 11–19.

23. Konorev D.V., Safonova N.L. Osnovnye povedencheskie reaktsii voditelya, privodyashchie k dorozhno-transportnym proissheslyam [The main behavioral reactions of the driver leading to road accidents]. *Sbornik materialov XVI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi provedeniyu v RF Goda nauki i tekhnologii v 2021 godu i 55-letiyu uchebnogo zavedeniya «Pozharnaya i aviinaya bezopasnost'»* [Proceedings of the XVI International scientific and practical conference dedicated to the Year of Science and Technology in the Russian Federation in 2021 and the 55th anniversary of the educational organization «Fire and emergency safety»]. Ivanovo, 2021, pp. 543–546.

24. Krupneishie avarii v Irkutskoi oblasti za 2023 god (Elektronnyi resurs) [The largest accidents in the Irkutsk region in 2023 (Electronic resource)]. Available at: <https://www.weacom.ru/articles/info/218588> (Accessed October 21, 2024).

25. Maloletkina N.S., Koroleva K.A. Detskii dorozhno-transportnyi travmatizm: prichiny v Rossii i zarubezhnyi opyt profilaktiki [Children's road traffic injuries: causes in Russia and foreign experience of prevention]. *Ugolovno-ispolnitel'noe pravo* [Criminal Executive Law], 2022, Vol. 17, no 1, pp. 85–90.

26. V Rossii vyroslo kolichestvo DTP s uchastiem detei (Elektronnyi resurs) [The number of road accidents involving children has increased in Russia (Electronic resource)]. Available at: <https://iz.ru/1636718/2024-01-19/v-rossii-vyroslo-kolichestvo-dtp-s-uchastiem-detei> (Accessed October 28, 2024).

27. GIBDD: adaptory «FEST» vne zakona! (Elektronnyi resurs) [Traffic police: FEST adapters are illegal! (Electronic resource)]. Available at: <https://www.drive2.ru/b/2215282/?ysclid=m312jk6bin697190034> (Accessed October 28, 2024).

28. O bezopasnosti detei na doroge i otvetstvennosti uchastnikov dorozhnogo dvizheniya – eksperty «Oblastnoi» (Elektronnyi resurs) [On the safety of children on the road and the responsibility of road users – experts from «Oblastnaya» (Electronic resource)]. Available at: <https://www.ogirk.ru/2023/08/24/o-bezopasnosti-detei-na-doroge-i-otvetstvennosti-uchastnikov-dorozhnogo-dvizheniya-jeksperty-oblastnoj/> (Accessed October 28, 2024).

29. Plan raboty MBU DO DDT po profilaktike detskogo dorozhno-transportnogo travmatizma na 2022 god (Elektronnyi resurs) [Work plan of MBU DO DDT for the prevention of child road traffic injuries for 2022 (Electronic resource)]. Available at: <https://782329.selcdn.ru/leonardo/uploadsForSiteId/200922/content/85dc3c34-3aa2-4c5f-bd42-39c5c936f996.pdf> (Accessed October 28, 2024).

30. Kvashis V.E. K probleme kul'tury protivodeistviya prestupnosti [On the problem of crime counteraction culture]. *Vestnik Krasnodarskogo universiteta MVD Rossii* [Bulletin of the Krasnodar University of the Ministry of Internal Affairs of Russian Federation], 2016, no 2(32), pp. 13 – 20.

31. Maloshina L.M., Khorosheva A.V. Vnedrenie intellektual'nykh transportnykh tekhnologii kak instrument povysheniya bezopasnosti transportnoi sredy [Implementation of intelligent transport technologies as a tool to improve the safety of the transport environment]. *Transportnoe pravo i bezopasnost'* [Transport Law and Security], 2022, no 2 (42), pp. 164–172.

32. Safe-Driving Technologies Available for Cars That Help Prevent Accidents in 2024 (Electronic resource). Available at: <https://arashlaw.com/20-safe-driving-technologies-available-for-cars-that-help-prevent-accidents> (Accessed October 28, 2024).

Информация об авторах

Асламова Вера Сергеевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: aslamovav@yandex.ru.

Асламов Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машин и аппаратов химических производств, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: aaa_mx@angtu.ru.

Шуткин Артем Алексеевич, спасатель Пожарно-спасательной службы Иркутской области, г. Иркутск; e-mail: a.shutkin@list.ru.

Information about the authors

Vera S. Aslamova, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of the Technosphere Safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: aslamovav@yandex.ru.

Alexander A. Aslamov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of the Machines and Devices of Chemical Production, Angarsk State Technical University, Angarsk; e-mail: aaa_mx@angtu.ru.

Artem A. Shutkin, Rescuer of the Fire and Rescue Service of the Irkutsk Region, Irkutsk; e-mail: a.shutkin@list.ru.

Перспективы развития инфраструктурного комплекса Монголии с учетом прироста грузопотока

Архит Буяннэмэх, В.А. Оленцевич✉

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

✉olencevich_va@mail.ru

Резюме

В рамках научной статьи дана оценка текущего состояния объектов инфраструктурного комплекса железных дорог Монголии и определены ключевые направления их перспективного развития в соответствии с приростом внутреннего и транзитного грузопотоков. Проведен анализ величины прогнозных значений грузопотоков до 2030 г. с учетом создания сети новых железнодорожных линий, намечены направления в границах представленной технической политики АО «Улан-Баторская железная дорога», основной задачей которых станет беспрепятственный пропуск плановых объемов поездопотоков, исключая возникновение случаев риска в соответствии с параметрами развития горнодобывающих регионов страны. Рассмотрены этапы сооружения и ввода в эксплуатацию новых объектов инфраструктурного комплекса железных дорог, необходимых для экспорта горнодобывающей продукции в Китай и на третьи рынки через морские порты Дальнего Востока России, Транссибирскую и Байкало-Амурскую магистрали. Изучены перспективы развития железных дорог России и Китая, проанализированы существующее их состояние и плановые мероприятия по сооружению стратегических высокоскоростных железнодорожных линий и высокоскоростных железных дорог общего пользования. По нашему мнению, Монголия может стать крупнейшим логистическим центром, связывающим Европу и Азию, поскольку появится возможность соединить маршруты железнодорожного транспорта в единую систему. Расширенная железнодорожная сеть обеспечит выход на рынки России, Китая и Европы. Монголия, Россия и Китай будут играть ключевую роль в железнодорожной сети Юго-Восточной Азии с точки зрения географии.

Ключевые слова

инфраструктурный комплекс, железные дороги Монголии, грузонапряженность, прогнозные значения грузопотоков, пропускная и перерабатывающая способности, развитие дорожно-транспортного сектора, техническое состояние магистральных путей, международные отношения, пограничные переходы

Для цитирования

Буяннэмэх Архит. Перспективы развития инфраструктурного комплекса Монголии с учетом прироста грузопотока / Архит Буяннэмэх, В.А. Оленцевич // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4 (84). С. 67–78. DOI 10.26731/1813-9108.2024.4(84).67-78.

Информация о статье

поступила в редакцию: 02.12.2024 г.; поступила после рецензирования: 16.12.2024 г.; принята к публикации: 17.12.2024 г.

Prospects for the development of Mongolia's infrastructure complex, taking into account the increase in cargo traffic

Arkhit Buyannemekh, V.A. Olentsevich✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉olencevich_va@mail.ru

Abstract

The scientific article provides an assessment of the current state of Mongolia's railway infrastructure facilities and identifies key areas for its future development, taking into account the increase in domestic and transit cargo flows. The forecast values of freight flows until 2030 have been calculated, taking into account the creation of a network of new railway lines. A set of directions has been outlined within the framework of the presented technical policy of JSC «Ulaanbaatar Railway», its main objectives being the unhindered passage of planned train traffic volumes, eliminating the occurrence of risk cases, in accordance with the development parameters of the mining regions of the country. The stages of construction and operation of new railway infrastructure facilities for the export of mining products to China and third markets through the seaports of the Russian Far East, the Trans-Siberian and Baikal-Amur mainlines are considered. The problems are identified and the prospects for improving the efficiency of the border crossings of neighboring states are set. The analysis of the existing state is carried out and the prospects for the development of the railways of Russia and China, as well as planned measures for the construction of strategic high-speed railway lines and high-speed public railways are considered. It has been revealed that Mongolia can become the largest logistics center connecting Europe and Asia, as it will be possible to connect railway transport routes into a single system. The expanded railway network will provide access to the markets of China, Russia and Europe. Mongolia, Russia and China will play a key role in the Southeast Asian railway network in terms of geography.

Keywords

the infrastructure complex, Mongolian railways, cargo intensity, forecast values of cargo flows, throughput and processing capacity, development of the road transport sector, technical condition of main roads, international relations, border crossings

For citation

Buyannemekh Arkhit, Olentsevich V.A. Perspektivy razvitiya infrastruktornogo kompleksa Mongolii s uchedom prirosta gruzopotoka [Prospects for the development of Mongolia's infrastructure complex, taking into account the increase in cargo traffic]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, No. 4(84), pp. 67–78. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.4(84).67-78.

Article Info

Received: December 2, 2024; Revised: December 16, 2024; Accepted: December 17, 2024.

Введение

Развитие железнодорожного транспорта в Монголии началось со строительства первой узкоколейной железной дорогой протяженностью 43 км, соединившей г. Улан-Батор и рудник Налайх в 1938 г. В 1949 г. было построено 400 км железной дороги широкой колеи до Улан-Батора, проходящей через российскую пограничную ст. Наушки и ст. Сухэ-Батор в Монголии. В 1956 г. ширококолейной железной дорогой, соединяющей Улан-Батор и железнодорожную ст. Дзамын-Уд общей протяженностью 1 110 км, завершилось строительство Трансмонгольской железной дороги. С тех пор с целью добычи и транспортировки природных ресурсов страны построено семь железнодорожных веток, примыкающих к главной железнодорожной линии, которые стали дорогами, соединяющими месторождения:

- медь-молибденовые (погрузка осуществляется на ст. Эрдэнэт);
- каменного угля (ст. Налайх, Шарын Гол и Баганур);
- плавикового шпата (ст. Бор-Ундур);
- нефти (ст. Дзунбаян);

– железной руды (ст. Тумуртэй и Хандгайт) [1–4].

Сегодня крупные проекты по развитию инфраструктурного комплекса железных дорог реализуются в рамках создания новой экономической структуры страны, что включено в долгосрочную политику развития Монголии «Видение 2050» и правительственную «Новую политику возрождения» [4, 5].

В рамках данной научной статьи поставлена цель дать оценку текущему состоянию инфраструктурного комплекса Монголии с учетом прогнозных значений грузопотоков до 2030 г. и определить направления его перспективного развития, рассмотреть плановые мероприятия по сооружению стратегических высокоскоростных железнодорожных линий и высокоскоростных железных дорог общего пользования Россия – Монголия – Китай.

Текущее состояние железнодорожной транспортной инфраструктуры Монголии

В настоящее время в Монголии действует пять железнодорожных линий, в том числе однопутная Трансмонгольская железная дорога, и



Рис. 1. Современное состояние железнодорожной сети Монголии

Fig. 1. Current state of the railway network in Mongolia

семь веток: Салхит – Эрдэнэт, Еруу – Тумуртэй, Восточная железная дорога направления Эрэнцав – Баянтумен и горнодобывающие железные дороги направления Дзунбаян – Тавантолгой, Тавантолгой – Гашун Сухайт, Ханги – Мандал в южном регионе (рис. 1) [1, 6]. Общая протяженность железных дорог Монголии представлена в табл. 1 [1, 4, 6].

Главной железнодорожной артерией Монголии является АО «Улан-Баторская железная дорога» (АО «УБЖД»), которая представляет собой совместное предприятие с долевым участием России (50/50) на основе российско-монгольского соглашения 1949 г.

Монгольские национальные железнодорожные компании Тавантолгой тумур зам (ТТЗ) и Монголын тумур зам (МТЗ), принадлежащие правительству Монголии, несут ответственность за строительство и эксплуатацию вновь построенных железнодорожных линий и участков пути. Железнодорожная компания отвечает за владение и эксплуатацию железных дорог, построенных за счет инвестиций частного сектора. Помимо данных компаний действует значительное количество мелких транспортных компаний по обслуживанию и эксплуатации

объектов инфраструктурного комплекса и перевозочной деятельности.

Протяженность Трансмонгольской железной дороги составляет 1 611 км, большая ее часть представляет собой ширококолейную неэлектрифицированную однопутную линию, за исключением участка Дархан – Сити-Роуд в северном регионе страны. Среднегодовая грузонапряженность составляет около 30 млн т. В состав АО «УБЖД» входит 78 железнодорожных станций и разъездов. Минимальный радиус кривых составляет 300 м, максимальное возвышение рельса – 150 мм, насыпь состоит из 442 сооружений, включая земляные сооружения и мостовые переходы [4, 6, 7].

Сегодня правительством страны поставлена цель по реализации перспективного транзитного грузопотока с учетом развития международных отношений Россия – Монголия – Китай, а также увеличению внутреннего грузопотока в 3 раза [7–10].

Политика развития дорожно-транспортного сектора Монголии

Создание новой экономической структуры Монголии предусматривает мощное развитие

Таблица 1. Общая протяженность железных дорог Монголии
Table 1. Total length of railways in Mongolia

Железнодорожная линия Railway line		Протяженность линии, км Line length, km	Направления Directions
Трансмонгольская железная дорога Trans-Mongolian Railway	Всего Total	1 611	–
	Главный ход Main route	1 100	Транссибирская железная дорога (Россия) Trans-Siberian Railway (Russia); Сухэ-Батор – Дзамын-Уд (КНР) Sukhbaatar - Dzamyin-Ud (PRC)
	Ответвления Branch lines	501	Семь ответвлений главного пути, включая направление Салхит – Эрдэнэт Seven branches of the main route, including the Salkhit – Erdenet direction
Баянтумэн – Эрэнцав Bayantumen – Erentsav		238	–
Тавантолгой – Дзунбаян Tavantolgoi – Dzunbayan		416	–
Тавантолгой – Гашун Сухайт Tavantolgoi – Gashun Sukhait		248	–
Ханги – Мандал Khangī – Mandal		227	–
Еруу – Тумуртэй Eruu – Tumurtei		105	–
Всего Total		2 845	–

дорожно-транспортной отрасли [4, 10]. Выдвинут комплекс задач: прокладка 2 966 км новых автодорог с твердым покрытием; строительство 3 358 км железнодорожных магистралей; развитие железнодорожной инфраструктуры в 13-ти провинциях страны, что позволит соединить одиннадцать транспортных направлений твердым покрытием и четыре – железными дорогами. Планируется проведение либерализации воздушного транспорта. В концепции регионального развития Монголии отражена значимость сооружения двухпутной линии в направлении Сухэ-Батор – БогдХан-Дзамын – Уд порт. Правительство установило срок действия программы с 2024 по 2028 г. Плановыми показателями реализации программы установлен общий объем грузооборота в транспортной сфере к 2030 г. в размере 180 млн т в год. Прогнозные значения величины грузоперевозок в связи с созданием сети новых железнодорожных линий Монголии представлены табл. 2 [2, 4, 9, 10].

В результате успешной реализации перечисленных проектов появится три железнодорожных транспортных коридора, соединяющих Россию, Монголию и Китай [9–12].

В рамках представленной технической политики АО «УБЖД» целесообразно реализовать комплекс направлений, основными задачами которого будет являться беспрепятственный пропуск прогнозных значений грузопотоков [1, 4, 9–16]:

1. Мероприятия, направленные на улучшение технического состояния магистральных путей и увеличение нагрузки на одну ось до 25 т, в том числе:

- полное обновление железнодорожных рельсов с заменой их на новые рельсы типа Р65;
- замена стрелочных переводов на новые стрелочные переводы марки Р65, 1/11;
- замена деревянных шпал и стрелочных брусьев железобетонными;
- полная замена балласта главных путей на щебеночный;
- выпрямление участков с малым радиусом кривых, где скорость движения поездов ограничена;
- сглаживание подъемов, которые ограничивают возможности для повышения весовых норм грузовых поездов;
- проведение реконструктивных мероприятий на действующих мостовых сооружениях и трубопроводах с целью обеспечения технических условий по нагрузке на одну ось до 25 т.

2. Приобретение инновационного подвижного состава с нагрузкой на одну ось 25 т (локомотивы, грузовые вагоны) и обновление имеющегося парка.

3. Повышение эффективности использования локомотивного парка.

4. Ускорение уровня оборачиваемости грузовых вагонов.

5. Обновление парка пассажирских вагонов, повышение их комфортности и вместимости в соответствии с современными требованиями пользователей.

6. Увеличение скорости движения поездов.

7. Повышение веса и длины грузовых поездов.

Таблица 2. Прогнозные значения грузопотока в связи с созданием сети новых железнодорожных линий

Table 2. Forecast values of freight traffic in connection with the creation of a network of new railway lines

Железнодорожная линия Railway line	Прогнозные значения грузопотока (млн т) Forecast values of cargo flow (million tons)
Сухэбатор – Дзамын Уд Sukhebator – Dзамын Ud	50,0
Чойбалсан – Хут-Бичигт Choibalsan – Khut-Bichigt	25,5
Тавантолгой – Дзунбаян Tavantolgoi – Dzunbayan	20,25
Дзунбаян – Ханги Dzunbayan – Khangi	20,85
Тавантолгой – Гашунсухайт Tavantolgoi – Gashunsukhait	30,0
Арцсур-Нарийнсухайт – Шивээхурен Artssur-Nariinsukhait – Shiveekhuren	25,5
Суммарный грузопоток Total freight traffic	172,1

8. Оптимизация процессов, связанных с управлением и организацией движения поездов посредством диспетчерской централизации.

9. Обновление парка существующей путевой машинной станции, используемой в рамках реконструкции инфраструктурного комплекса железных дорог.

10. Создание новой современной высоко-технологичной путевой машинной станции, что позволит реализовать потребности по увеличению годовых объемов капитального ремонта.

11. Обновление технической и технологической базы для ремонта подвижного состава.

12. Модернизация действующих технологий по регулярному содержанию путей, создание оптимальных условий для проведения плановых профилактических работ, повышение уровня механизации ремонтных работ.

13. Модернизация устаревших систем централизации и блокировки.

14. Реализация мероприятий по повышению эффективности использования системы интервального регулирования движения поездов SIRDP-E с целью оптимизации процессов регулирования скорости и времени движения поездов на участках.

15. Электрификация главной магистрали.

16. Проведение технических мероприятий в рамках прироста уровня пропускной и провозной мощностей объектов инфраструктурного комплекса, реализация программы технической модернизации АО «УБЖД» до 2030 г., разработанной ОАО «Мосгипротранс».

17. Строительство вторых главных путей на участках и направлениях с высокими перспективными на долгосрочный период размерами поездопотоков.

18. Создание и оснащение нового инновационного центра, необходимого для внедрения и апробации передовых железнодорожных технологических процессов и производств.

19. Поиск возможностей для участия в новых международных железнодорожных проектах, планируемых к реализации.

Политика развития железных дорог Монголии в основном реализуется в соответствии с развитием горнодобывающих регионов. Что касается улучшения и обновления объектов инфраструктурного комплекса железных дорог как экономически эффективного ресурса транспортной отрасли с целью экспорта богатых внутренних природных ресурсов на третий

рынок, то государственная политика в области железнодорожного транспорта предусматривает поэтапное строительство новой железнодорожной сети. По согласованию государства с представителями отрасли добычи полезных ископаемых определены планы и направления строительства внутренней и международной железнодорожной сети [4, 7, 17, 18].

При определении и реализации политики правительства Монголии в области железнодорожного транспорта железная дорога в основном ориентируется на такие вопросы, как разработка стратегических месторождений и увеличение экспорта горнодобывающей продукции, соединение с соседними странами посредством железнодорожной инфраструктуры, а также строительство национальной дорожной сети, соединяющей крупные города. В данную программу входят следующие крупные направления:

– диверсификация железнодорожных маршрутов, соединяющих Китай и Россию, путем создания трехфазной внутренней железнодорожной сети;

– создание оптимальной системы доступа к третичным рынкам путем строительства новой внутренней железнодорожной сети и соединения стратегических месторождений посредством железнодорожных магистралей;

– производство продукции с добавленной стоимостью за счет переработки горнодобывающей продукции на промышленных комплексах, построенных вдоль новой железнодорожной сети.

Планируется поэтапное строительство новых железных дорог с целью эффективной организации будущего спроса на перевозки за счет увеличения пропускной и перерабатывающей способностей объектов железнодорожного транспорта.

В рамках государственной политики 2010 г. было запланировано построить в общей сложности 5 683 км новых железнодорожных линий. С тех пор было одобрено к дополнительному строительству 1 060 км в 2018 г. и 1 209 км в 2021 г. Общая протяженность планируемой железнодорожной инфраструктуры должна составить к 2030 г. около 7 802 км.

Первый этап сооружения новой железной дороги – это железнодорожная линия, предназначенная для экспорта горнодобывающей продукции в Китай и на третий рынок, соединяющаяся с портом Восточный на Дальнем Во-

стоке через Транссибирскую и Байкало-Амурскую магистрали. Это будет железнодорожная линия, которая позволит стране выйти на рынки стран Азиатско-Тихоокеанского региона (Корея и Япония), соединит южный регион и восточный регион Монголии. Основными транзитными станциями будут Тавантолгой – Дзунбаян – Сайншанд – Эренцав. Линия планируется на широкой колее.

Кроме того, очевидно, что на данный момент в капитальном ремонте нуждается инфраструктурный комплекс железнодорожной линии от ст. Чойбалсан до ст. Эренцав, которая, согласно программе развития, соединит проект первого этапа строительства с последующими. С завершением строительства первой очереди линии ожидается, что годовая потребность в пассажирских перевозках увеличится в 5–10 раз, а потребность в грузовых перевозках – на 50 млн т. Общая протяженность линии составит около 1 040 км.

В настоящее время строительство железнодорожной линии Тавантолгой – Дзунбаян завершено. Общая длина маршрута Даланзадгад – Тавантолгой – Цагаан Суварга – Дзунбаян составляет 500 км. Общая длина направления Сайншанд – Барун Урт – 350 км. Общая протяженность маршрута Барун Урт – Хут – 140 км. Общая протяженность маршрута Хут – Чойбалсан – 150 км.

Строительство второй очереди железной дороги позволит проложить маршрут для экспорта природных ресурсов со стратегических месторождений. В 2010 г. одобрено строительство четырех железнодорожных линий общей протяженностью 893 км, предполагающее соединение месторождений с приграничными станциями соседних стран – Китая и России. В 2018 г. Великий Народный Хурал Монголии одобрил добавление базовых линий Дзунбаян – Ханги и Эрдэнэт – Арцсур, а в 2021 г. был также утвержден план соединения трассы Нарынсухайт – Шивехурен с базовой линией Арцсур.

Строительство второй очереди направлено на экспорт природных ресурсов в Китай и Россию, а также ставит целью увеличение размеров грузоперевозок в 2 раза. Сооружение данной линии позволит снизить грузоперевозки между Россией и Китаем по действующей в настоящее время Трансмонгольской железной дороге. Линия представляет собой в общей сложности 3 162 км железных дорог в шести направлениях, из которых маршрут Тавантолгой – Гашуун-Сухайт введен в эксплуатацию в сентябре 2022 г.; маршрут Дзунбаян-Ханги в ноябре 2022 г. Общая протяженность маршрута Дзунбаян – Нарийн Сухайт – Шивехурен составляет 1 255 км. Общая протяженность маршрута Тавантолгой – Гашуун Сухайт – 267 км. Длина линии Хут – Тамсагбулаг –



Рис. 2. Проект железнодорожного строительства согласно политике правительства Монголии
Fig. 2. Railway construction project according to the policy of the Mongolian government

Нумруг – 380 км. Длина линии Хут – Бичигт – 200 км. Общая протяженность маршрута Дзунбаян – Ханги – 280 км. Общая протяженность маршрута Эрдэнэт – Арцсур – 780 км.

Третьим этапом развития является сооружение железнодорожной линии в западном регионе, которую планируется развивать в соответствии с использованием расположенных в регионе месторождений полезных ископаемых, ростом местного населения, экономическим развитием и сохранением баланса окружающей среды. Основными направлениями являются: железнодорожная линия, соединяющая месторождения и ст. Цагаанур по железной дороге; линии, соединяющие юго-западный регион с приграничными станциями с целью увеличения грузопотока. Маршруты окончательно утверждены за исключением направления Улан-Батор – Хархорин, ожидается, что общая протяженность составит около 3 600 км. Общая протяженность маршрута Улан-Батор – Хархорин составит 330 км.

После успешной реализации проектов Монголия получит Западную региональную железную дорогу и Северо-Западную региональную железную дорогу (рис. 2) [5, 17–21].

Помимо поэтапного строительства железных дорог политика правительства в области

железнодорожного транспорта также включает стандарты колеи, правовую базу функционирования внутренней железнодорожной сети, а также финансирование существующих и будущих железнодорожных проектов. В качестве реализации общего принципа политики железнодорожные линии, которые будут построены в Монголии, планируется сооружать на ширине колеи 1 520 мм, а ширину колеи линий, которые будут напрямую транспортировать сырье от месторождений полезных ископаемых до пограничных железнодорожных станций соседних государств, планируется оговаривать на уровне правительства сопредельных стран [5, 17–21].

Деятельность владельцев железнодорожной инфраструктуры, а также транспортных компаний по обслуживанию и эксплуатации объектов инфраструктурного комплекса и перевозочной деятельности предполагается регулировать законодательством Монголии как независимых предприятий, а в правовую документацию вносить изменения по мере развития железнодорожной отрасли. Необходимые средства для строительства и модернизации объектов инфраструктурного комплекса железных дорог могут быть взяты в счет государственных ресурсов, средств частного сектора и льготных кредиторов.

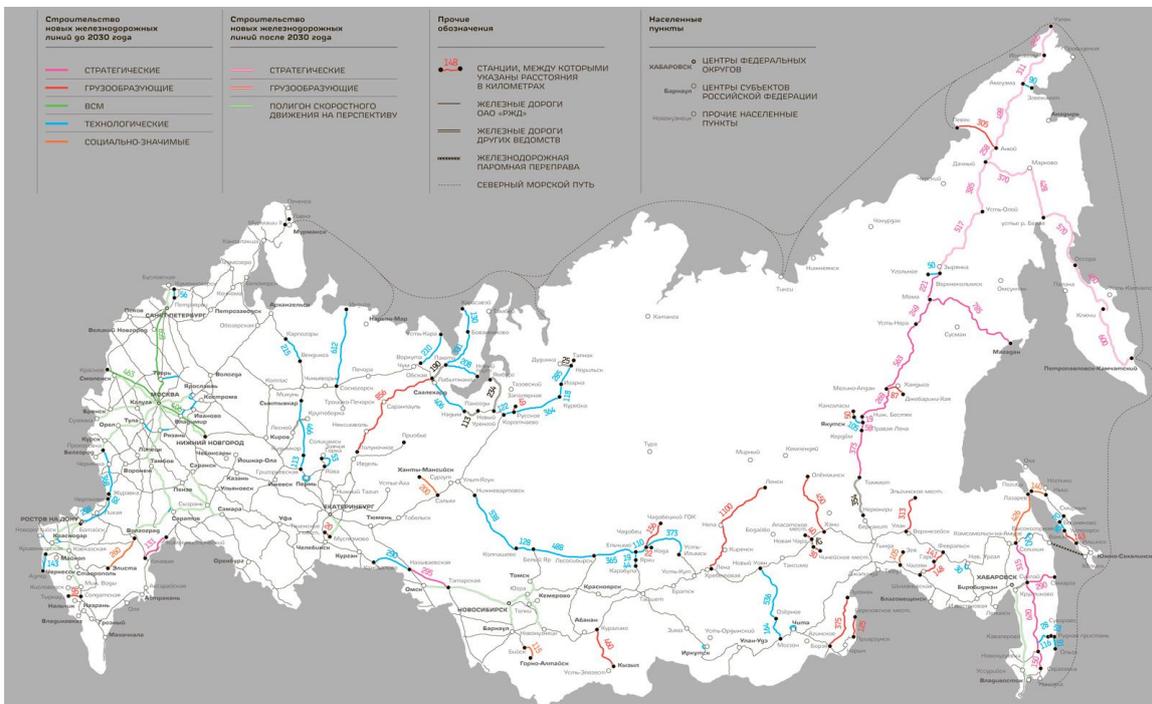


Рис. 3. Существующая железнодорожная сеть в Российской Федерации и планирование ее развития до 2030 г.

Fig. 3. The existing railway network in the Russian Federation and planning for its development up to 2030

Перспективы развития железных дорог Российской Федерации

Перспективы развития транспортной структуры Монголии тесно связаны с развитием транспорта РФ, Китая и Восточной Азии [3, 5, 9, 17].

В рамках стратегического плана развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г., утвержденного решением Правительства России от 17 июня 2008 г. № 877, будет реализован комплекс мероприятий, направленных на увеличение уровня пропускной и перерабатывающей способностей монгольских железных дорог: реконструкция АО «УБЖД», включая внедрение системы автоматической блокировки на главных путях; электрификация экономически значимых объектов инфраструктурного комплекса; строительство второго главного пути протяженностью 100 км и другие меры. Также планируется модернизировать участок Улан-Удэ – Наушки с целью обеспечения эффективности грузоперевозок в направлении АО «УБЖД» (рис. 3) [4, 5, 8].

Перспективы развития железных дорог Китая

По состоянию на 2015 г. общая протяженность железнодорожной сети Китая составляла 121 тыс. км, в 2020 г. параметры сети увеличены до 150 тыс. км, а к 2025 г. – до 175 тыс. км.

В 2016 г. комиссия по развитию и реформам КНР, Министерство дорог и транспорта КНР и Китайская железнодорожная компания совместно утвердили средне- и долгосрочное планирование железнодорожной сети. Плановые мероприятия разделены на две укрупненные группы: сооружение стратегической высокоскоростной железнодорожной линии и высокоскоростной железной дороги общего пользования. Программа предусматривает поэтапную реализацию: среднесрочную до 2025 г. и долгосрочную – до 2030 г. (рис. 4) [1, 6, 9, 20].

В документах «Среднесрочное и долгосрочное планирование сети железных дорог Монголии» и «Сеть высокоскоростных железных дорог Китая» говорится, что на основе политики функционирования международного



Рис. 4. Средне- и долгосрочное планирование развития железнодорожной сети Китая
Fig. 4. Medium- and Long-Term Planning for the Development of China's Railway Network

транспортного коридора «Пояс и путь» Монголия будет поддерживать железнодорожное сообщение между Китаем и соседними странами и улучшать развитие инфраструктурного комплекса приграничных железнодорожных станций [1, 17, 18]. В рамках данного направления планируется строительство новых современных пограничных переходов и модернизация существующих: Мандал (Ханги), Улзий (Цагаандел – Уул), Лаомяо (Бургастай) и Улиастай (Байтаг) в северо-западном направлении региона, повышение уровня пропускной способности объектов железнодорожного транспорта Жинин-Эрен в северо-восточном направлении страны. Планируется также строительство железной дороги до порта Архашаат (Хавирга).

Китай также планирует построить 997 км высокоскоростных железных дорог и 1 100 км электрифицированных железных дорог, соединяющих Монголию, Китай и Россию, исходя из преимуществ географического положения Монголии в координации с национальной программой Монголии «Степной путь» в рамках инициативы «Пояс и путь» [1, 4, 9, 22].

Заключение

Расширение железнодорожной сети Монголии до 7 802 км будет способствовать улучшению внутренней транспортной логистики страны и окажет существенное влияние на увеличение пропускных и провозных мощностей при организации международных перевозок. Модернизация и расширение инфраструктурного комплекса железных дорог позволит повысить пропускную и перерабатывающую способность сферы грузовых перевозок, будет способствовать приросту объемов экспорта горнодобывающей продукции. Например, важную роль в развитии горнодобывающей промышленности играет железная дорога Тавантолгой – Гашуунсухайт.

Монголия может стать крупнейшим логистическим центром, связывающим Европу и Азию, поскольку имеет возможность соединить маршруты железнодорожного транспорта в

единую систему. Расширенная железнодорожная сеть обеспечит выход на рынки Китая, России и Европы.

Развитие железнодорожной инфраструктуры будет способствовать экономическому росту страны, что позволит увеличить налоговые поступления и размеры валютных резервов. Правительство Монголии проводит политику поддержки инвестиций частного сектора в железнодорожный комплекс, что важно для повышения эффективности строительства. В рамках железнодорожных инноваций внедрение таких проектов, как технологические достижения, автоматизация и цифровизация производственных процессов может сделать транспортные операции менее трудоемкими, безопасными и экономичными. В последние годы увеличивается количество подвижного состава, необходимого для железнодорожных перевозок. В настоящее время доля частного сектора в общем объеме железнодорожного подвижного состава достаточно высока, планируется ее увеличить до 65 %, что будет способствовать приросту количества частных предприятий по его ремонту и обслуживанию, а значит и росту числа рабочих мест в регионах.

Таким образом, расширение железнодорожной сети Монголии имеет стратегическое значение для транспортных систем и комплексов Европы и Азии, будет играть важную роль в международном экономическом развитии. Планируется создание трех железнодорожных транспортных коридоров, соединяющих Россию, Монголию и Китай. Общий грузооборот железнодорожной сети Монголии увеличится до 180 млн т, параметры транзитных грузоперевозок вырастут до 8,3 млн т. В последнее время произошли значительные положительные изменения в международном сотрудничестве сопредельных государств, запланировано большое количество проектных решений.

Список литературы

1. National statistics office of Mongolia // сайт. URL : <https://en.nso.mn> (Дата обращения 15.11.2024).
2. Транспорт Монголии: недавние успехи в строительстве железных дорог // New Eastern Outlook : сайт. URL : <https://journal-neo.su/ru/2023/10/21/transport-mongolii-nedavnie-uspehi-v-stroitelstve-zheleznyh-dorog> (Дата обращения 08.11.2024).
3. Правительство Монголии представило программу действий на четыре года // БуряадҮнэн : сайт. URL : <https://burunen.ru/news/society/131542-pravitelstvo-mongolii-predstavilo-programmu-deystviy-na-chetyre-goda> (Дата обращения 08.11.2024).

4. Политика долгосрочного развития Монголии: «Видение – 2050» // Монголия сейчас : сайт. URL : <http://www.mongolnow.com/politika-dolgosrochnogo-razvitiya-mongolii-videnie-2050/> (Дата обращения 29.11.2024).
5. Сценарии развития Восточной Сибири и российского Дальнего Востока в контексте политической и экономической динамики Азиатско-Тихоокеанского региона до 2030 года : анализ. доклад / Л.А. Аносова, А.Г. Коржубаев, А.Н. Панов и др. М. : Едиториал УРСС, 2011. 120 с. URL : <http://econom.nsc.ru/ieie/Izdan/trudi/korzubaev/doklad.pdf> (Дата обращения 28.11.2024).
6. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 29.11.2024).
7. О транспортных перспективах и надеждах Монголии // Монголия сейчас : сайт. URL : <http://www.mongolnow.com/9970-2> (Дата обращения 08.11.2024).
8. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Доступ из справ.-правов. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
9. Динец Д.А., Конотопов М.В. Международные транспортные коридоры: перспективы для России // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. Т. 2. С. 48–53.
10. В Монголии утверждена «новая политика возрождения для стимулирования экономики» // News : сайт. URL : <https://news.myseldon.com/ru/news/index/264902086> (Дата обращения 08.11.2024).
11. Оленевич В.А., Архит Б., Новикова Н.А. Аспекты реализации проекта экономического коридора «Россия – Монголия – Китай» // Финансовые аспекты структурных преобразований экономики. 2024. № 10. С. 72–82.
12. Оленевич В.А., Архит Б., Брытков В.С. Вопросы развития транспортной инфраструктуры Монголии // Наука и образование: достижения и перспективы : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. Самара–Саратов, 2023. С. 13–17.
13. Динец Д.А., Сокольников М.А., Ломаченко С.С. Технологии и финансы: четвертый и пятый технологические уклады // Инновации и инвестиции. 2016. № 11. С. 2–8.
14. Оленевич В.А., Гозбенко В.Е. Задачи приспособления транспортной инфраструктуры к новым технологиям // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2021. № 8. С. 189–190.
15. 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. Вологда, 2019. С. 16–17.
16. Воинова Д.В., Пузина Е.Ю. Повышение эффективности функционирования энергетических объектов муниципальной инфраструктуры // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2016. Т. 2. С. 170–175.
17. Премьер-министр Монголии представил программу развития страны // Красная Весна : сайт. URL : <https://rossaprimavera.ru/news/230fd96a> (Дата обращения 27.11.2024).
18. ГК 1520 и «Монгольские Железные Дороги» будут развивать железнодорожную инфраструктуру Монголии // Comnews.ru : сайт. URL : <https://www.comnews.ru/content/230028/2023-11-08/2023-w45/1011/gk-1520-i-mongolskie-zheleznye-dorogi-budut-razvivat-zheleznodorozhnyuyu-infrastrukturu-mongolii> (Дата обращения 08.11.2024).
19. Агрегированный критерий оценки эффективности функционирования участков Улан-Баторской железной дороги / С.И. Носков, М.П. Базилевский, Ю.А. Трофимов и др. // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 5 (39). С. 159–164.
20. Плюснина О.М. Проблемы развития международной транспортной инфраструктуры Монголии // Экономический рост: проблемы, закономерности, перспективы : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2017. С. 103–105.
21. Носков С.И., Базилевский М.П., Врублевский И.П. Оценка результатов среднесрочного прогнозирования эксплуатационных характеристик железной дороги // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 1 (45). С. 51–57.
22. Караулова А.В., Базилевский М.П. Оценка степени нелинейности парных квазилинейных регрессий на примере моделирования грузооборота железнодорожного транспорта России // Прикладная математика: современные проблемы математики, информатики и моделирования : материалы II Всерос. науч.-практ. конф. Краснодар, 2020. С. 61–66.

References

1. National Statistical Office of Mongolia [Electronic resource]. Available at: <https://en.nso.mn> (Accessed November 15, 2024).
2. Transport Mongolii: nedavnie uspekhi v stroitel'stve zheleznykh dorog (Elektronnyi resurs) [Mongolia's transport: recent successes in railway construction (Electronic resource)]. Available at: <https://journal-neo.su/ru/2023/10/21/transport-mongolii-nedavnie-uspehi-v-stroitelstve-zheleznykh-dorog> (Accessed November 8, 2024).
3. Pravitel'stvo Mongolii predstavilo programmu deistvii na chetyre goda (Elektronnyi resurs) [The Government of Mongolia has submitted a four-year action program (Electronic resource)]. Available at: <https://burunen.ru/news/society/131542-pravitelstvo-mongolii-predstavilo-programmu-deystvii-na-chetyre-goda> (Accessed November 8, 2024).
4. Politika dolgosrochnogo razvitiya Mongolii: «Videnie – 2050» (Elektronnyi resurs) [Mongolia's Long-term Development Policy: «Vision – 2050» (Electronic resource)]. Available at: <http://www.mongolnow.com/politika-dolgosrochnogo-razvitiya-mongolii-videnie-2050/> (Accessed November 29, 2024).
5. Anosova L.A., Korzhubaev A.G., Panov A.N., Vikhanskii O.S., Potapov V.Ya., Ostrovskii A.V., Renzin O.M., Zaverskii S.M., Kononova V.Yu., Filimonova I.V., Eder L.V., Bakhturov A.S., Bezryadin M.V., Kartashov S.V., Mishenin M.V., Nevedeev A.V., Plekhanov D.A., Rasputin M.V., Saunin O.V., Sergeev A.S., Stollyar V.A., Yudin D.V. et al. Stsenarii razvitiya Vostochnoi Sibiri i rossiiskogo Dal'nego Vostoka v kontekste politicheskoi i ekonomicheskoi dinamiki Aziatsko-

Tikhookeanskogo regiona do 2030 goda : analiticheskii doklad [Scenarios for the development of Eastern Siberia and the Russian Far East in the context of the political and economic dynamics of the Asia-Pacific region until 2030 : an analytical report]. Moscow: Unitorial URSS Publ., 2011. 120 p. Available at: <http://econom.nsc.ru/ieie/Izdan/trudi/korjubaev/doklad.pdf> (Accessed November 28, 2024).

6. Rossiiskie zheleznye dorogi (elektronnyi resurs) [Russian Railways (electronic resource)]. Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed November 29, 2024).

7. O transportnykh perspektivakh i nadezhdakh Mongolii (Elektronnyi resurs) [About Mongolia's transport prospects and hopes (Electronic resource)]. Available at: <http://www.mongolnow.com/9970-2> (November 8, 2024).

8. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»].

9. Dinets D.A., Konotopov M.V. Mezhdunarodnye transportnye koridory: perspektivy dlya Rossii [International transport corridors: prospects for Russia]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, Vol. 2, pp. 48–53.

10. V Mongolii utverzhdena «novaya politika vozrozhdeniya dlya stimulirovaniya ekonomiki» (Elektronnyi resurs) [A «new revival policy to stimulate the economy» was approved in Mongolia (Electronic resource)]. Available at: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/264902086> (Accessed November 8, 2024).

11. Olentsevich V.A., Arkhit B., Novikova N.A. Aspekty realizatsii proekta ekonomicheskogo koridora «Rossiya – Mongoliya – Kitai» [Aspects of the implementation of the Russia – Mongolia – China Economic Corridor project]. *Finansovye aspekty strukturnykh preobrazovaniy ekonomiki* [Financial aspects of structural transformations of the economy], 2024, no 10, pp. 72–82.

12. Olentsevich V.A., Arkhit B., Brytkov V.S. Voprosy razvitiya transportnoi infrastruktury Mongolii [Issues of development of Mongolia's transport infrastructure]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka i obrazovanie: dostizheniya i perspektivy»* [Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference «Science and education: achievements and prospects»]. Samara – Saratov, 2023, pp. 13–17.

13. Dinets D.A., Sokol'nikov M.A., Lomachenko S.S. Tekhnologii i finansy: chetvertyi i pyatyi tekhnologicheskie układy [Technologies and finance: the fourth and fifth technological structures]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments], 2016, no 11, pp. 2–8.

14. Olentsevich V.A., Gozbenko V.E. Zadachi prispособleniya transportnoi infrastruktury k novym tekhnologiyam [The tasks of adapting transport infrastructure to new technologies]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technical progress], 2021, no 8, pp. 189–190.

15. Astashkov N.P., Olentsevich A.A. Izmenenie tekhnologii raboty transportno-tekhnologicheskoi sistemy zheleznodorozhnogo transporta za schet ispol'zovaniya novogo tipa podvizhnogo sostava [Changing the technology of the railway transport and technological system through the use of a new type of rolling stock]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka segodnya: zadachi i puti ikh resheniya»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Science today: tasks and ways to solve them»]. Vologda, 2019, pp. 16–17.

16. Voinova D.V., Puzina E.Yu. Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya energeticheskikh ob'ektov munitsipal'noi infrastruktury [Improving the efficiency of the functioning of energy facilities of municipal infrastructure]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation «Improving the efficiency of energy production and use in Siberia»]. Irkutsk, 2016, Vol. 2, pp. 170–175.

17. Prem'er-ministr Mongolii predstavil programmu razvitiya strany (Elektronnyi resurs) [The Prime Minister of Mongolia presented the country's development program (Electronic resource)]. Available at: <https://rossaprimavera.ru/news/230fd96a> (Accessed November 27, 2024).

18. GK 1520 i «Mongol'skie Zheleznye Dorogi» budut razvivat' zheleznodorozhnuyu infrastrukturu Mongolii (Elektronnyi resurs) [State Corporation 1520 and Mongolian Railways will develop Mongolia's railway infrastructure (Electronic resource)]. Available at: <https://www.comnews.ru/content/230028/2023-11-08/2023-w45/1011/gk-1520-i-mongolskie-zheleznye-dorogi-budut-razvivat-zheleznodorozhnuyu-infrastrukturu-mongolii> (Accessed November 8, 2024).

19. Noskov S.I., Bazilevskii M.P., Trofimov Yu.A., Buyannemekh A. Agregirovannyi kriterii otsenki effektivnosti funktsionirovaniya uchastkov Ulan-Batorskoi zheleznoi dorogi [Aggregated criterion for evaluating the effectiveness of the Ulaanbaatar Railway sections]. *Yuzhno-Sibirskii nauchnyi vestnik* [South Siberian Scientific Bulletin], 2021, no 5 (39), pp. 159–164.

20. Plyusnina O.M. Problemy razvitiya mezhdunarodnoi transportnoi infrastruktury Mongolii [Problems of development of Mongolia's international transport infrastructure]. *Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Ekonomicheskii rost: problemy, zakonomernosti, perspektivy»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Economic growth: problems, patterns, perspectives»]. Penza, 2017, pp. 103–105.

21. Noskov S.I., Bazilevskii M.P., Vrublevskii I.P. Otsenka rezul'tatov srednesrochnogo prognozirovaniya ekspluatatsionnykh kharakteristik zheleznoi dorogi [Evaluation of the results of medium-term forecasting of operational characteristics of the railway]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2020, no 1 (45), pp. 51–57.

22. Karaulova A.V., Bazilevskii M.P. Otsenka stepeni nelineinosti parnykh kvazilineinykh regressii na primere modelirovaniya gruzooborota zheleznodorozhnogo transporta Rossii [Estimation of the degree of nonlinearity of paired quasi-linear re-

gressions on the example of modeling freight turnover in Russian railway transport]. *Materialy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Prikladnaya matematika: sovremennye problemy matematiki, informatiki i modelirovaniya»* [Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference «Applied Mathematics: modern problems of mathematics, computer science and modeling»]. Krasnodar, 2020, pp. 61–66.

Информация об авторах

Архит Буяниэмэх, аспирант кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: buyan_s@yahoo.com.

Оленцевич Виктория Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olencevich_va@mail.ru.

Information about the authors

Arkhit Buyannemekh, Ph.D. student of the Department of Operation Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: buyan_s@yahoo.com.

Victoriya A. Olentsevich, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olencevich_va@mail.ru.

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

INFORMATION TECHNOLOGY

Применение цифрового двойника предприятия для оценки производственных показателей транспортной организации

В.В. Кашковский¹✉, Ю.М. Краковский¹, В.А. Начигин¹, П.С. Назаров²

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

²Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉victor.kashkovskij@mail.ru

Резюме

Массовая эксплуатация любых видов транспортных средств требует существенных капитальных вложений и финансовых затрат на обслуживание и ремонт эксплуатируемой техники. Для получения оптимальных производственных показателей транспортной организации необходимо осуществлять управление производственными фондами и задействованными в работе с ними специалистами. В настоящее время решение подобных задач происходит интуитивно, на основании предшествующего опыта руководителей, поэтому весьма актуален вопрос реализации научного подхода к управлению транспортными предприятиями. В данной статье представлены результаты поиска варианта оптимальной загрузки группы обслуживания и ремонта транспортной организации. В качестве инструмента для разрешения этой и других управленческих проблем транспортной организации предлагается цифровой двойник предприятия. Анализ предметной области показал, что на данный момент получение подобных результатов какими-либо другими методами исследования, кроме этого, не представляется возможным. Исходными данными для построения цифрового двойника являются результаты испытаний изделий на надежность и хронометраж выполнения работ. Применение указанного метода позволило провести ряд исследований производственных показателей гипотетической транспортной организации, в частности был осуществлен поиск варианта оптимальной загрузки группы обслуживания и ремонта. Однако на этом возможности цифрового двойника предприятия далеко не исчерпаны. Модель при вводе соответствующих исходных данных позволяет решать целый ряд производственных задач, далеко выходящих за рамки этой работы. Представленный цифровой двойник предприятия может использоваться не только на производстве, но и при изучении некоторых технических дисциплин бакалавриата, специалитета и магистратуры, например, таких как «Надежность в технике», «Техническая диагностика», «Организация перевозок и управление на транспорте» (железнодорожный транспорт). Кроме того, имеется возможность применять его в качестве тренажера для обучения и переподготовки руководящих кадров.

Ключевые слова

управление на транспорте, цифровой двойник предприятия, транспортная организация, обслуживание и ремонт объектов транспорта, средняя наработка на отказ, интенсивность отказов

Для цитирования

Применение цифрового двойника предприятия для оценки производственных показателей транспортной организации / В.В. Кашковский, Ю.М. Краковский, В.А. Начигин, П.С. Назаров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4 (84). С. 80–90. DOI 10.26731/1813-9108.2024.4(84).80-90.

Информация о статье

поступила в редакцию: 03.09.2024 г.; поступила после рецензирования: 06.12.2024 г.; принята к публикации: 09.12.2024 г.

Using a digital twin of an enterprise to assess the production performance of a transport organization

V.V. Kashkovskii¹✉, Yu.M. Krakovskii¹, V.A. Nachigin¹, P.S. Nazarov²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg named after Air Chief Marshal A.A. Novikov, the Russian Federation

✉victor.kashkovskij@mail.ru

Abstract

Mass operation of any type of transport requires significant capital investments and financial costs for the maintenance and repair of the equipment in use. To obtain optimal production indicators of a transport organization, it is necessary to manage production assets and specialists involved in operation. Currently, such problems are solved intuitively, based on the previous experience of managers. Therefore, the task of implementing a scientific approach to the management of transport organizations is quite relevant. This paper presents the results of searching for an optimal variant of the service and repair group workload of a transport organization. A digital twin of an enterprise is proposed as a tool for solving this and other management problems of a transport organization. The analysis of the subject area showed that at the moment it is not possible to obtain such results by any other

research methods, except for a digital twin of an enterprise. The initial data for constructing a digital twin of an enterprise are the results of product reliability tests and work timing. The use of a digital twin of an enterprise made it possible to perform a number of studies of the production indicators of a hypothetical transport organization and, in particular, to search for an optimal variant of the service and repair group workload of a transport organization. However, the capabilities of a digital twin of an enterprise are far from exhausted. The model, when entering the appropriate initial data, allows to solve a number of production problems that go far beyond the scope of this work. The digital twin of the enterprise presented in the work can be used not only in production, but also in studying a number of technical disciplines of the bachelor's, specialist and master's degrees such as «Reliability in Engineering», «Technical Diagnostics», «Organization of Transportation and Management in Transport» (Railway Transport). In addition, the digital twin of the enterprise can be used as a simulator for training and retraining the management personnel.

Keywords

transport management, digital twin of an enterprise, transport organization, maintenance and repair of transport facilities, mean time between failures, failure rate

For citation

Kashkovskii V.V., Krakovskii Yu.M., Nachigin V.A., Nazarov P.S. Primenenie tsifrovogo dvoynika predpriyatiya dlya otsenki proizvodstvennykh pokazatelei transportnoi organizatsii [Using a digital twin of an enterprise to assess the production performance of a transport organization]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, No. 4(84), pp. 80–90. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.4(84).80-90.

Article info

Received: September 3, 2024; Revised: December 6, 2024; Accepted: December 9, 2024.

Введение

Массовая эксплуатация любых видов транспортных средств требует существенных капитальных вложений и финансовых затрат на обслуживание и ремонт эксплуатируемой техники. Для получения оптимальных производственных показателей транспортной организации необходимо осуществлять управление производственными фондами и задействованными в работе с ними специалистами. В настоящее время решение подобных задач осуществляется интуитивно, на основании предшествующего опыта руководителей, поэтому весьма актуальна задача реализации научного подхода к управлению транспортными организациями. Для исследования производственного процесса транспортной организации ее деятельность независимо от вида транспорта (железнодорожный, автомобильный, воздушный и т.п.) целесообразно представить в виде графов, используемых для описания переходов состояний в системах массового обслуживания (СМО). Описание деятельности транспортного предприятия в виде графов переходов состояний позволяет использовать теорию СМО для решения ряда важных производственных задач, в первую очередь осуществлять поиск оптимального варианта использования имеющихся у данной организации расходуемых ресурсов. Поскольку любые ресурсы можно выразить в денежном эквиваленте, постольку эффективный или неэффективный их расход на практике

может привести как к существенному повышению прибыли, так и к большим неоправданным финансовым потерям. Исходя из актуальности решения задач по поиску оптимального варианта расходования ресурсов транспортной организации, целью данной работы является исследование и рациональный выбор параметров управления ей.

Характерным примером СМО является система технической эксплуатации (СТЭ). Под СТЭ далее будем понимать здания, сооружения, средства транспорта, контрольно-поверочную аппаратуру, средства ремонта и ремонтное оборудование, штатный состав групп обслуживания и ремонта, другие людские и материальные средства, необходимые для обеспечения работы парка однотипных технических объектов (изделий) [1]. В настоящей работе СТЭ будем называть транспортную организацию, занимающуюся массовой эксплуатацией однотипной техники.

Теория СМО имеет самую широкую область применения в различных жизненно значимых отраслях: экономике, социальной сфере, военном деле, в области организации производства и обслуживания, на транспорте, связи и др. [2–13].

СМО – система, которая производит обслуживание поступающих в нее требований (заявок). Потоки событий, возникающие в СМО, рассматриваются в теории массового обслуживания. В свою очередь теория массового

обслуживания – это раздел теории вероятностей, изучающий потоки требований, поступающих в СМО и выходящих из них, длительности ожидания начала обслуживания, длины очередей и прочие характеристики СМО [2–13].

Представленный в рамках данной работы цифровой двойник предприятия (транспортной организации или СТЭ) является системой с ожиданием, он имеет накопитель бесконечной емкости для буферизации поступивших заявок на обслуживание парка технических объектов. Технические объекты (далее для краткости технические объекты будем называть просто объектами или изделиями) могут находиться в исправном состоянии, состоянии отказа, состоянии плановой замены и др. Ожидающие требования на обслуживание объектов образуют очередь. Все работы на объектах осуществляет группа обслуживания, штаты которой могут быть укомплектованы специалистами разной квалификации. Исходными данными для построения цифрового двойника предприятия являются результаты испытаний изделий на надежность и хронометраж выполнения работ.

Чаще всего принято рассматривать СМО с бесконечным объемом парка эксплуатируемых объектов. В этом случае потоки событий перехода системы из одного состояния в другое являются простейшими (стационарными пуассоновскими). Это позволяет использовать для описания СМО математический аппарат марковских моделей. На практике объем парка изделий, эксплуатируемых в рамках исследуемой

СТЭ, может быть достаточно ограниченным. В этом случае потоки событий будут нестационарными, а плотность времени распределения между событиями перехода системы из одного состояния в другое отличаться от экспоненциальной. Такая СМО может быть описана и исследована с помощью математического аппарата полумарковских моделей [14–24]. Однако, не смотря на неизбежные упрощения вербальной модели СТЭ, математический аппарат ее полумарковской модели получается исключительно сложным. Другая проблема заключается в том, что столь же сложно перевести известные показатели надежности объектов в априори неизвестные показатели интенсивности нестационарных потоков событий и закон плотности распределения времени между соседними событиями в потоке. Главная проблема в том, что с помощью полумарковской модели невозможно описать такие широко распространенные эксплуатационные мероприятия как, например, организация ступенчатой выработки ресурса и др. В результате полумарковская модель получает существенное количество упрощений по отношению к моделируемой системе и не позволяет исследовать многие свойства и параметры СТЭ. При таких упрощениях исследование СТЭ теряет практический смысл.

Выходом из сложившейся ситуации является применение цифрового двойника предприятия, имитирующего работу транспортной организации.

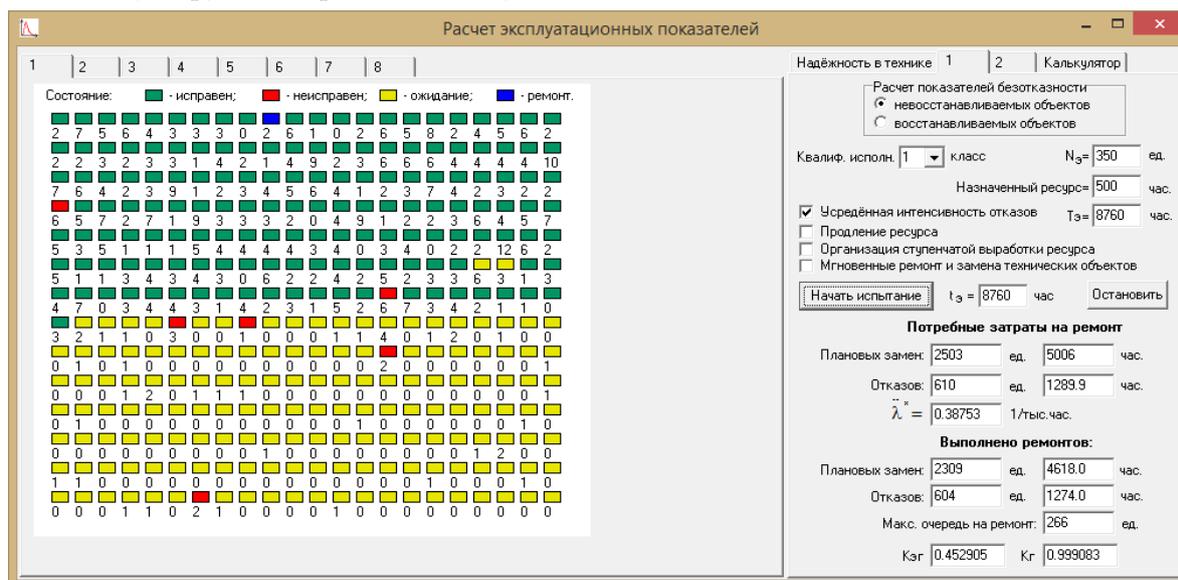


Рис. 1. Программная реализация цифрового двойника предприятия
Fig. 1. Software implementation of an enterprise digital twin

Вербальное описание цифрового двойника предприятия и постановка задачи

Реализация статистической модели СТЭ – это оригинальный программный продукт, разработанный авторами (рис. 1).

СТЭ имеет системные ограничения:

1. Объем парка технических объектов N_3 , эксплуатируемых в ходе моделирования работы СТЭ, переменная величина. Она задается в начале эксперимента в диапазоне от 10 до 1 000 объектов и не может быть изменена в его ходе.

2. В эксперименте могут участвовать либо восстанавливаемые, либо невосстанавливаемые объекты. При отказе невосстанавливаемых объектов они заменяются на новые с нулевой наработкой. Приведение восстанавливаемых объектов в работоспособное состояние осуществляется ремонтом. После ремонта восстанавливаемого объекта его начальная наработка равна наработке на момент отказа. В начале эксперимента и после замены по ресурсу все объекты имеют нулевую наработку.

Эксплуатация объектов осуществляется по ресурсу. Назначенный ресурс объектов задается до начала эксперимента. Максимальный назначенный ресурс $T_p = 1\,400$ ч. Поскольку максимальная наработка объектов до первого отказа T_1 составляет примерно 1 400 ч., постольку $T_p = 1\,400$ ч. соответствует эксплуатации объектов до отказа. Выполнение других планово-предупредительных мероприятий на объектах, кроме замены по ресурсу, не предусмотрено.

Исправные технические объекты работают непрерывно и круглосуточно на протяжении всего эксперимента. Продолжительность эксперимента T_3 может быть задана от одного года ($T_3 = 8\,760$ ч.) до пяти лет ($T_3 = 43\,800$ ч.).

Одновременные плановые замены большого числа объектов резко увеличивают очередь на обслуживание и делают работу группы обслуживания нестабильной. Для увеличения равномерности работы группы обслуживания в СТЭ возможна организация ступенчатой выработки ресурса. При организации ступенчатой выработки ресурса в начале эксперимента на эксплуатацию поступает только 10 % от полного объема парка объектов. Через 100 ч эксплуатации t_3 к ним добавляется еще 10 % и т.д. Таким образом, парк объектов достигает полного объема при достижении системой времени эксплуатации t_3 1 000 ч.

Вторым методом организации более равномерной работы группы обслуживания является продление ресурса. Если объект выработал назначенный ресурс, но группа ремонта занята, то ему назначается продление ресурса. Объект не снимается с эксплуатации и продолжает работать до того времени, пока не освободится группа обслуживания. Если в процессе ожидания объект наработал 50 ч сверх назначенного ресурса T_p , то он снимается с эксплуатации и встает в очередь на обслуживание.

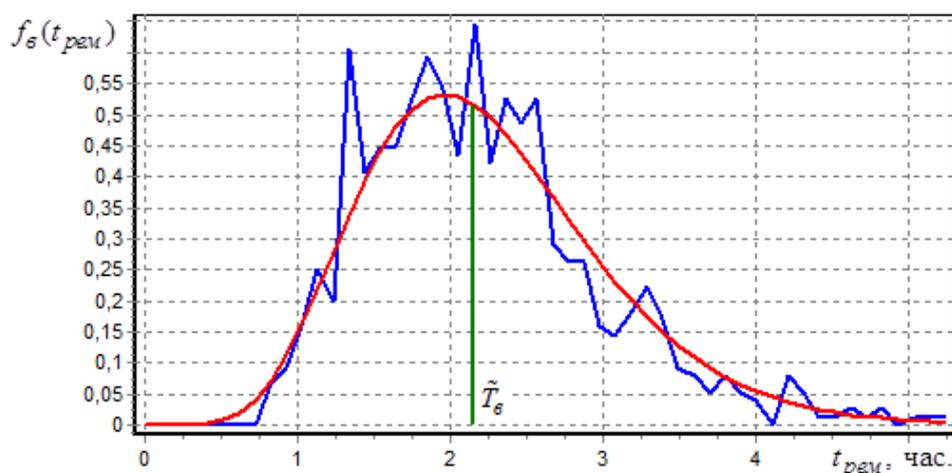


Рис. 2. Плотность распределения времени выполнения ремонта группой обслуживания, укомплектованной специалистами первого класса (красный график – теоретическая плотность распределения времени выполнения ремонта по закону Эрланга; синий график – статистическая плотность времени выполнения ремонта)

Fig. 2. Density of distribution of repair time by a maintenance group staffed by 1st class specialists (the red graph is the theoretical distribution density of the repair time according to Erlang's law; the blue graph is the statistical density of repair completion time)

Группа обслуживания

Все работы на объектах выполняет одна группа обслуживания. На протяжении эксперимента она работает непрерывно (24 ч в сут.) в три смены. Одновременно группа обслуживания может выполнять работы только на одном объекте.

Неисправные объекты и объекты, выработавшие ресурс, либо поступают на ремонт или замену в группу обслуживания, либо дождаются в очереди на ремонт и обслуживание. Время ожидания в очереди не ограничено, выход из очереди возможен только для выполнения работ в группе обслуживания.

В рассматриваемой СТЭ все объекты имеют порядковый номер. Очередь отказавших и выработавших ресурс объектов общая. Объекты из общей очереди обслуживаются в порядке номеров. Первыми обслуживаются объекты с минимальными номерами. Если группа обслуживания перегружена, то объекты с максимальными номерами останутся необслуженными до конца эксперимента.

Время ремонта объекта – это случайная величина, подчиненная закону распределения Эрланга (рис. 2). Параметры плотности распределения $f_b(t_{\text{рем}})$ зависят от квалификации специалистов группы, которая задается до начала эксперимента. На практике показатели распределения времени выполнения ремонта \tilde{T}_e (среднее время ремонта) и $\tilde{\sigma}_e$ (среднеквадратическое отклонение времени выполнения ремонта) определяются хронометражем и пересчитываются в показатели распределения Эрланга. Время ремонта измеряется в часах.

Полное время ремонта состоит из времени диагностики и времени ремонта. Время диагностики распределено по закону $f_d(t_d)$, близкому по форме к закону Эрланга (рис. 3).

Время плановой замены объекта – не случайная величина, заданная регламентом выполнения плановых работ, зависит от квалификации специалистов группы обслуживания. Для специалистов первого класса время плановой замены составляет 2 ч, для специалистов второго класса – 4 ч, для специалистов третьего класса – 6 ч.

Технический объект

Показатели надежности объекта определяются плотностью распределения наработки до отказа $f(t)$, полученной при испытании объекта на надежность. В статистической модели СТЭ показатели надежности объектов заданы генератором случайных чисел, плотность распределения вероятностей которого показана на рис. 3. Плотность распределения наработки до отказа объекта, эксплуатируемого в статистической модели СТЭ, имеет три периода: А – период приработки; Б – период нормальной эксплуатации; В – период старения (рис. 4).

При постановке нового объекта на эксплуатацию генератор случайных чисел с плотностью распределения $f(t)$ задает этому объекту время наработки до первого отказа t_1 . Если это невосстанавливаемый объект, то при наработке t_1 он выбывает из эксплуатации; если восстанавливаемый объект, то при наработке t_1 он поступает в ремонт. После ремонта генератор случайных чи-

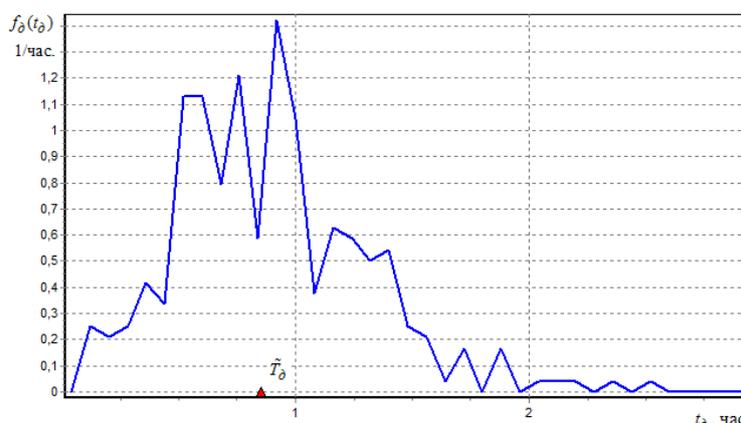


Рис. 3. Плотность распределения времени диагностирования $f_d(t_d)$ группой обслуживания, укомплектованной специалистами первого класса (среднее время диагностирования $\tilde{T}_d = 0,86$ ч)

Fig. 3. Density of distribution of diagnostic time $f_d(t_d)$ by a service group staffed with 1st class specialists (average diagnosis time $\tilde{T}_d = 0,86$ h)

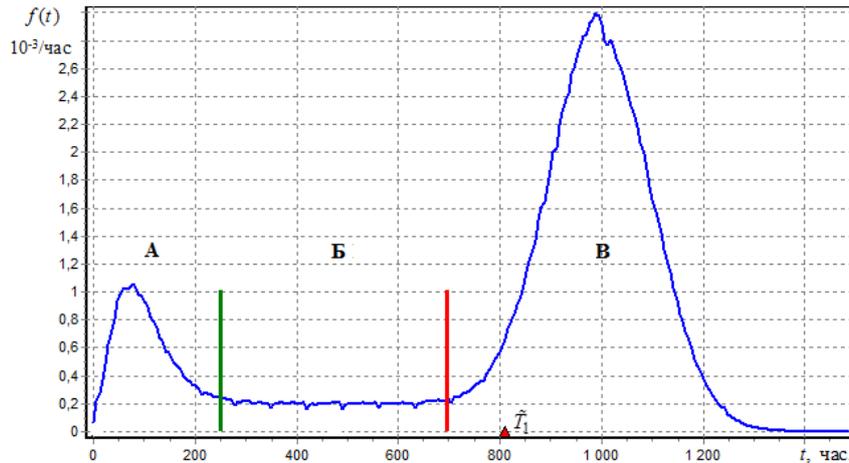


Рис. 4. Плотность распределения наработки до отказа технических объектов (среднее время наработки до первого отказа $\tilde{T}_1 = 810,6$ ч)

Fig. 4. Distribution density of time to failure of technical objects (average time to first failure $\tilde{T}_1 = 810,6$ h)

сел задает ему время наработки до второго отказа $t_2 > t_1$. При втором отказе задается время наработки до третьего отказа $t_3 > t_2$ и т.д., до выработки назначенного ресурса.

Граф состояний технического объекта показан на рис. 5.

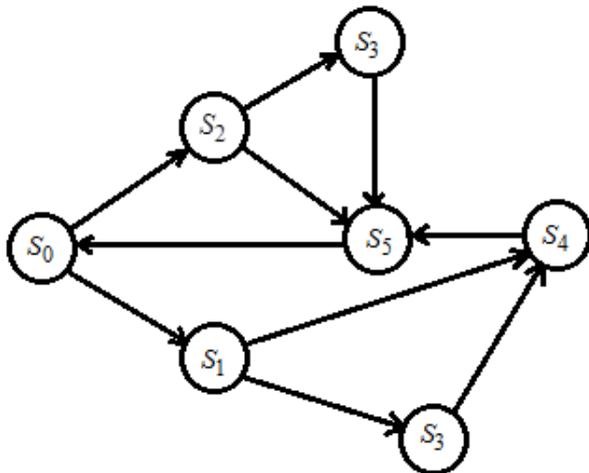


Рис. 5. Граф состояний технического объекта:

S_0 – исправный объект; S_1 – объект в состоянии отказа; S_2 – объект в состоянии выработки назначенного ресурса; S_3 – объект в очереди на обслуживание или ремонт; S_4 – состояние диагностики объекта; S_5 – состояние ремонта или плановой замены объекта

Fig. 5. State graph of a technical object:

S_0 – a serviceable object; S_1 – an object in a state of failure; S_2 – an object in a state of exhaustion of the assigned resource; S_3 – an object in a queue for maintenance or repair; S_4 – the state of diagnostics of the object; S_5 – the state of repair or planned replacement of the object

Построение типового графика интенсивности отказов. Проверка адекватности статистической модели системы технической эксплуатации

Интенсивность потока отказов $\tilde{\lambda}(\Delta t_{эi})$ для невосстанавливаемых объектов является важнейшим эксплуатационными показателями безотказности:

$$\tilde{\lambda}(\Delta t_{эi}) = \frac{\Delta n_i}{\Delta t \sum \Delta t_{эi}}, \quad (1)$$

где Δn_i – число отказов на интервале времени эксплуатации парка однотипной техники $\Delta t_{эi}$; $\Delta t \sum (\Delta t_{эi})$ – суммарное приращение наработки объектов на интервале времени эксплуатации парка однотипной техники $\Delta t_{эi}$.

В теории марковских процессов предполагается, что плотности распределения времени между соседними событиями в потоках требований являются экспоненциальными. В этом случае интенсивности переходов определены выражением:

$$\tilde{\lambda} = \frac{1}{T_1},$$

где $\tilde{\lambda}$ – установившееся значение интенсивности отказов.

В моделируемой СТЭ установившаяся интенсивность отказов при эксплуатации до отказа равна:

$$\tilde{\lambda} = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{810,6} = 1,233 \cdot 10^{-3} / \text{ч.}$$

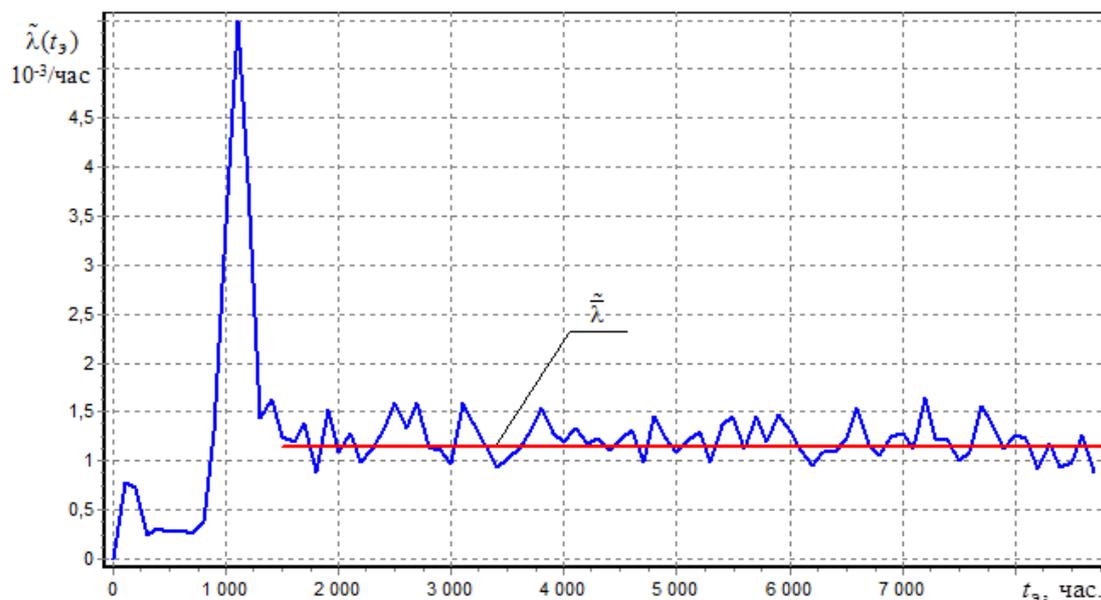


Рис. 6. График интенсивности отказов $\tilde{\lambda}(\Delta t_3)$ и установившееся значение $\bar{\lambda}$, полученные в эксперименте по эксплуатации 300 невосстанавливаемых объектов до отказа ($T_p = 1\,400$ ч) специалистами первого класса на протяжении $T_3 = 8\,760$ ч

Fig. 6. Graph of failure rate $\tilde{\lambda}(\Delta t_3)$ and steady-state value $\bar{\lambda}$ obtained in an experiment on the operation of 300 non-repairable objects to failure ($T_p = 1\,400$ h) by first class specialists over a period of $T_3 = 8\,760$ h

Для проверки адекватности цифрового двойника предприятия построим график зависимости (1) при эксплуатации 300 невосстанавливаемых объектов до отказа ($T_p = 1\,400$ ч) на протяжении $T_3 = 8\,760$ ч. При построении графика определим среднее значение интенсивности отказов на интервале $t_3 = (1\,500, T_3)$. Результат показан на рис. 6.

По результатам данного эксперимента получена установившаяся интенсивность отказов, равная $\bar{\lambda} = 1,136 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$. При этом погрешность оценки $\bar{\lambda}$ по сравнению с $\bar{\lambda}$ составила чуть менее 9%, что является допустимой статистической погрешностью, поскольку в наших исследованиях большой интерес представляют именно качественные оценки «больше – меньше» и т.п.

Относительно большая погрешность в данном эксперименте вызвана тем, что в идеальном эксперименте $T_3 \rightarrow \infty$, соответственно, при меньших значениях T_3 статистические погрешности будут больше и наоборот. Так, в эксперименте продолжительностью $T_3 = 43\,800$ ч (пять лет эксплуатации), оценка $\bar{\lambda}$ составила $1,221 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$. Это дает менее 1% погрешности.

Таким образом, равенство $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}$ является тестовой задачей на адекватность цифрового двойника предприятия.

Установившаяся интенсивность отказов зависит от назначенного ресурса T_p [1]. Исследование подобных зависимостей имеет большое практическое значение.

Постановка задачи исследования

В результате эксперимента (см. рис. 6), пиковая интенсивность отказов при $t_3 \approx 1\,100$ ч составила примерно $5,5 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$. Это в 4,5 раза больше, чем $\bar{\lambda}$. Этот пик вызван тем, что при $t_3 \approx 1\,100$ ч начинается массовое старение объектов (см. рис. 4). При запуске объектов в эксплуатацию наработка всех объектов равна нулю. В дальнейшем, из-за того, что замена отказавших объектов происходит одновременно, наработка каждого объекта в парке становится случайной величиной, поэтому таких выбросов интенсивности отказов больше не происходит.

В этом эксперименте также был получен график зависимости размера очереди на ремонт и замену от t_3 (рис. 7).

Эксперимент показал, что на время эксплуатации $t_3 \approx 1\,100$ ч приходится максималь-

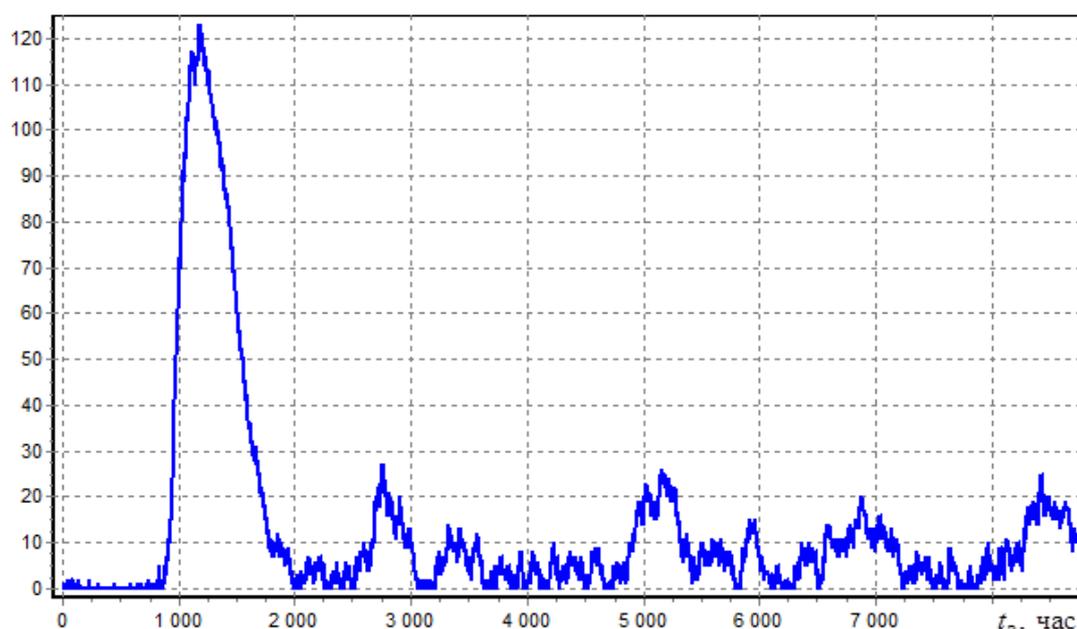


Рис. 7. Очереди на ремонт, полученные при проведении эксперимента по эксплуатации 300 невосстанавливаемых объектов до отказа ($T_p = 1\,400$ ч) специалистами первого класса на протяжении $T_s = 8\,760$ ч
Fig. 7. Queues for repairs received during an experiment on the operation of 300 non-repairable objects to failure ($T_p = 1\,400$ h) by first class specialists for $T_s = 8\,760$ h

ное значение очереди объектов на замены отказов. Пик вызван тем, что производственной мощности группы обслуживания недостаточно для выполнения массовых замен объектов после отказов.

Наличие указанных закономерностей выявляет ряд актуальных научных задач по поиску оптимальных параметров СТЭ. Ввиду большого объема полученных результатов здесь ограничимся исследованием только некоторых аспектов эксплуатации невосстанавливаемых объектов.

Оценка максимально возможного числа эксплуатируемых объектов и оптимальной загрузки группы обслуживания

Очевидно, что если поручить группе обслуживания эксплуатировать чрезмерно большой парк объектов, то группа не сможет поддерживать все объекты в исправном состоянии. Существует максимальный (предельный) объем парка технических объектов N_{\max} , при превышении которого все избыточные объекты выпадут из процесса эксплуатации. Вычисление оценки N_{\max} является важной научной и производственной задачей.

Цифровой двойник предприятия (СТЭ) может работать в следующих режимах:

1. Режим эксплуатации парка объектов без дополнительных мероприятий.

2. Режим эксплуатации парка объектов с продлением ресурса.

3. Режим эксплуатации парка объектов с организацией ступенчатой выработки ресурса.

4. Режим эксплуатации парка объектов с продлением ресурса и организацией ступенчатой выработки ресурса.

Зададим в СТЭ заведомо избыточный объем парка технических объектов, равный 350. Для каждого режима работы СТЭ выполним по десять опытов с назначенным ресурсом объектов 500–1 400 ч. Во всех случаях продолжительность эксплуатации один год или 8 760 ч. Это соответствует типовому периоду отчетности транспортной организации.

По результатам эксперимента построим графики зависимости установившейся интенсивности отказов $\lambda^{\%}(T_p)$ и максимального объема парка технических объектов $N_{\max}(T_p)$.

Анализ полученных результатов показывает, что второй и четвертый режимы вызывают некоторый рост установившейся интенсивности отказов на интервале назначенного ресурса 700–1 200 ч, вызванный продлением ресурса (рис. 8).

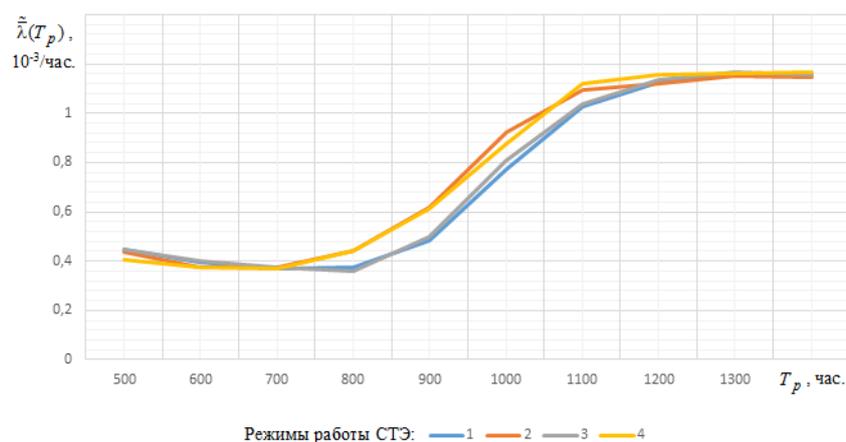


Рис. 8. Зависимость установившейся интенсивности отказов $\bar{\lambda}(T_p)$ от назначенного ресурса T_p

Fig. 8. Dependence of the steady-state failure rate $\bar{\lambda}(T_p)$ on the assigned resource T_p

В то же время продление ресурса вызывает некоторое уменьшение нагрузки на группу обслуживания, что приводит к небольшому увеличению максимального объема парка технических объектов $N_{\max}(T_p)$ (рис. 9).

На основании выполненных экспериментов можно сделать вывод, что если для данного назначенного ресурса $N_3 \leq 0,35N_{\max}$, то это слабонагруженная группа обслуживания. Если $0,35N_{\max} \leq N_3 \leq 0,75N_{\max}$, то это средненагруженная группа обслуживания. При $N_3 > 0,75N_{\max}$ имеет место сильно нагруженная (перегруженная) группа обслуживания.

Возьмем в качестве эталона на 100 % загруженную группу обслуживания, которая экс-

плуатирует парк изделий объемом $N_{\max}(T_p)$. Исследование производственных показателей транспортной организации с помощью цифрового двойника показало, что наилучшие показатели будут достигнуты при 50 %-ной нагрузке группы $N_{50\%}$ (табл.).

Заключение

В данной работе представлены результаты поиска варианта оптимальной загрузки группы обслуживания. На данный момент получение подобных результатов каким-либо другими методами исследования, кроме цифрового двойника предприятия, не представляется возможным. Однако на этом возможности

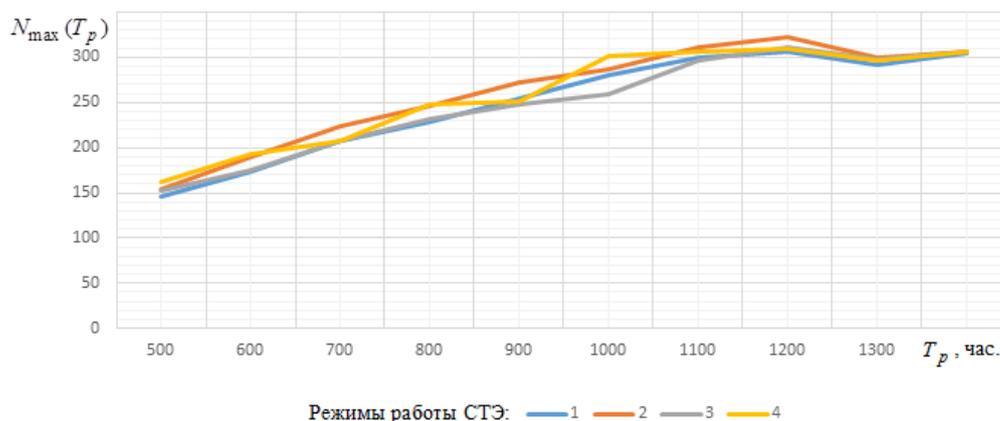


Рис. 9. Зависимость максимального объема парка технических объектов N_{\max} от назначенного ресурса T_p

Fig. 9. Dependence of the maximum volume of a fleet of technical objects N_{\max} on the assigned resource T_p

Зависимость максимальной и 50%-ной загрузок группы обслуживания в зависимости от назначенного ресурса
Dependence of maximum and 50 % loads of the service group depending on the assigned resource

T_p , ч	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400
N_{\max} , шт.	146	174	207	228	255	281	299	307	292	305
$N_{50\%}$, шт.	73	87	104	114	128	141	150	154	146	153

цифрового двойника предприятия далеко не исчерпаны. Модель при вводе соответствующих исходных данных позволяет решать целый ряд производственных задач, далеко выходящих за рамки данной работы. Представленный в статье цифровой двойник предприятия может использоваться не только на производстве, но и при изучении ряда технических дисциплин бакалавриата, специалитета и ма-

гистратуры, например таких как «Техническая надежность», «Техническая диагностика», «Организация перевозок и управление на транспорте» (железнодорожный транспорт) и др. Кроме того, цифровой двойник предприятия может использоваться в качестве тренажера для обучения, переподготовки инженерных руководящих кадров на транспорте.

Список литературы

1. Кашковский В.В. Исследование законов функционирования систем технической эксплуатации промышленных и транспортных объектов. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2012. 312 с.
2. Солнышкина И.В. Теория систем массового обслуживания. Комсомольск-на-Амуре : КнАГТУ, 2015. 76 с.
3. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М. : Машиностроение, 1979. 432 с.
4. Бочаров П.П., Печинкин А.В. Теория массового обслуживания. М. : РУДН, 1995. 528 с.
5. Беляев Ю.К. Массового обслуживания теория // Большая российская энциклопедия : сайт. URL : <https://old.bigenc.ru/mathematics/text/2191088> (Дата обращения 30.08.2024).
6. Боровков А.А. Асимптотические методы в теории массового обслуживания. М. : Наука, 1980. 381 с.
7. Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания. М. : Высшая школа, 1982. 256 с.
8. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. М. : Наука, 1987. 336 с.
9. Новиков О.А., Петухов С.И. Прикладные вопросы теории массового обслуживания. М. : Советское радио, 1969. 399 с.
10. Лабскер Л.Г., Бабешко Л.О. Теория массового обслуживания в экономической сфере. М. : Банки и биржи ; ЮНИТИ, 1998. 318 с.
11. Хинчин А.Я. Работы по математической теории массового обслуживания. М. : Физматгиз, 1963. 236 с.
12. Чернецкий В.И. Математическое моделирование стохастических систем. Петрозаводск : ПГУ, 1994. 485 с.
13. Handbuch der Bedienungstheorie II : Formeln und andere Ergebnisse / K. Arndt, U. Arndt, G.P. Bascharin u.a. Berlin : Akademie-Verlag, 1984. 608 s.
14. Борисевич А.В., Дякин Н.В. Полумарковская модель для оценки показателей надежности источника бесперебойного питания дата-центра // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 8-1 (52). С. 23–27.
15. Зеленый О.В., Носовский А.В., Стадник О.А. Полумарковские модели в задачах оценки надежности и риска от эксплуатации АЭС // Проблемы безопасности атомных электростанций та Чернобиля. 2007. № 7. С. 30–40.
16. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. Киев : Наук. думка, 1976. 184 с.
17. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы Марковского восстановления в задачах надежности систем. Киев : Наук. думка, 1982. 235 с.
18. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания / А.Н. Корлат, В.Н. Кузнецов, М.М. Новиков и др. Кишинев : Штиинца, 1991. 275 с.
19. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М. : Советское радио, 1975. 471 с.
20. Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Песчанский А.И. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием. Севастополь : СевГТУ, 2000. 286 с.
21. Ахмедов Г.М., Асланов Д.Г. Применение полумарковских моделей восстанавливаемых систем для расчета основных показателей надежности электровазозов переменного тока // Universum: технические науки. 2018. № 3 (48). С. 72–77.
22. Grabski F. Applications of semi-Markov processes in reliability // Reliability: Theory & Applications. 2007. Vol. 2. № 3-4 (7). P. 66–75.
23. Grabski F. Semi-Markov failure rates processes // Applied Mathematics and Computation. 2011. Vol. 217. Iss. 24. P. 9956–9965. DOI:10.1016/j.amc.2011.04.055.
24. Limnios N., Oprisan G. Semi-Markov Processes and Reliability. Boston : Birkhauser, 2001. 225 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-0161-8.

References

1. Kashkovskii V.V. Issledovanie zakonov funktsionirovaniya sistem tekhnicheskoi ekspluatatsii promyshlennykh i transportnykh ob'ektov [Research of the laws of functioning of technical operation systems of industrial and transport facilities]. Saarbrücken: Lambert Academic Publ., 2012. 312 p.
2. Solnyshkina I.V. Teoriya sistem massovogo obsluzhivaniya [Theory of queuing systems]. Komsomol'sk-on-Amur: KnAGTU Publ., 2015. 76 p.
3. Kleinrock L. Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Queuing systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979. 432 p.
4. Bocharov P.P., Pechinkin A.V. Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Theory of queuing]. Moscow: RUDN Publ., 1995. 528 p.
5. Belyaev Yu.K. Massovogo obsluzhivaniya teoriya (elektronnyi resurs) [Theory of queuing (electronic resource)]. Available at: <https://old.bigenc.ru/mathematics/text/2191088> (Accessed August 30, 2024).
6. Borovkov A.A. Asimptoticheskie metody v teorii massovogo obsluzhivaniya [Asymptotic methods in queuing theory].

Moscow: Nauka Publ., 1980. 381 p.

7. Ivchenko G.I., Kashtanov V.A., Kovalenko I.N. Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Queuing theory]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1982. 256 p.

8. Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya [Introduction to queuing theory]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 336 p.

9. Novikov O.A., Petukhov S.I. Prikladnye voprosy teorii massovogo obsluzhivaniya [Applied issues of queuing theory]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1969. 399 p.

10. Labsker L.G., Babeshko L.O. Teoriya massovogo obsluzhivaniya v ekonomicheskoi sfere [The theory of queuing in the economic sphere]. Moscow: Banki i birzhi Publ.; UNITI Publ., 1998. 318 p.

11. Khinchin A.Ya. Raboty po matematicheskoi teorii massovogo obsluzhivaniya [Proceedings on the mathematical theory of queuing]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1963. 236 p.

12. Chernetskii V.I. Matematicheskoe modelirovanie stokhasticheskikh sistem [Mathematical modeling of stochastic systems]. Petrozavodsk: PGU Publ., 1994. 485 p.

13. Arndt K., Arndt U., Bascharin G.P. usw. Handbuch der Bedienungstheorie II : Formeln und andere Ergebnisse. Berlin : Akademie-Verlag Publ., 1984. 608 s.

14. Borisevich A.V., Dyakin N.V. Polumarkovskaya model' dlya otsenki pokazatelei nadezhnosti istochnika bescpereboinogo pitaniya data-tsentra [Semi-Markov model for assessing the reliability indicators of an uninterruptible power supply for a data center]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern scientific research and innovation], 2015, no 8-1 (52), pp. 23–27.

15. Zelenyi O.V., Nosovskii A.V., Stadnik O.A. Polumarkovskie modeli v zadachakh otsenki nadezhnosti i riska ot ekspluatatsii AES [Semi-Markov models in problems of reliability and risk assessment from NPP operation]. *Problemi bezpeki atomnikh elektrostantsii ta Chornobilya* [Safety problems of nuclear power plants and Chernobyl], 2007, no 7, pp. 30-40.

16. Korolyuk V.S., Turbin A.F. Polumarkovskie protsessy i ikh prilozheniya [Semi-Markov Processes and Their Applications]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1976. 184 p.

17. Korolyuk V.S., Turbin A.F. Protsessy Markovskogo vosstanovleniya v zadachakh nadezhnosti sistem [Markov Recovery Processes in Problems of System Reliability]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1982. 235 p.

18. Korlat A.N., Kuznetsov V.N., Novikov M.M., Turbin A.F. Polumarkovskie modeli vosstanavlivaemykh sistem i sistem massovogo obsluzhivaniya [Semi-Markov models of recoverable systems and queuing systems]. Chisinau: Shtiintsa Publ., 1991. 275 p.

19. Kozlov B.A., Ushakov I.A. Spravochnik po raschetu nadezhnosti apparatury radioelektroniki i avtomatiki [Handbook of Reliability Calculation for Radio Electronics and Automation Equipment]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1975. 471 p.

20. Kopp V.Ya., Obzherin Yu.E., Peschanskii A.I. Stokhasticheskie modeli avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem s vremennym rezervirovaniem [Stochastic models of automated production systems with time reservation]. Sevastopol': SevGTU Publ., 2000. 286 p.

21. Akhmedov G.M., Aslanov D.G. Primenenie polumarkovskikh modelei vosstanavlivaemykh sistem dlya rascheta osnovnykh pokazatelei nadezhnosti elektrovozov peremennogo toka [Application of semi-Markov models of recoverable systems for calculating the main reliability indicators of AC electric locomotives]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences], 2018, no 3 (48), pp. 72–77.

22. Grabski F. Applications of semi-Markov processes in reliability // *Reliability: Theory & Applications*, 2007, Vol. 2, no 3-4 (7), pp. 66–75.

23. Grabski F. Semi-Markov failure rates processes // *Applied Mathematics and Computation*, 2011, Vol. 217, iss. 24, pp. 9956–9965. DOI: 10.1016/j.amc.2011.04.055.

24. Limnios N., Oprisan G. Semi-Markov Processes and Reliability. Boston: Birkhauser Publ., 2001. 225 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-0161-8.

Информация об авторах

Каишковский Виктор Владимирович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, доцент, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: viktor.kashkovskij@mail.ru.

Краковский Юрий Мечеславович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru.

Начигин Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: nachiginv@yandex.ru.

Назаров Павел Сергеевич, старший преподаватель кафедры радиоэлектронных систем, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, г. Санкт-Петербург; e-mail: NazPS@yandex.ru.

Information about the authors

Victor V. Kashkovskii, Doctor of Engineering Science, Senior Researcher, Associate Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: viktor.kashkovskij@mail.ru.

Yurii M. Krakovskii, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru.

Vladimir A. Nachigin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: nachiginv@yandex.ru.

Pavel S. Nazarov, Assistant Professor of the Department of Radioelectronic Systems, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Air Chief Marshal A.A. Novikov, Saint Petersburg; e-mail: NazPS@yandex.ru.

Оценка точности графического метода кинематического анализа с использованием анимационного моделирования в CAD-системе «Компас»

В.В. Капшунов✉, Т.Э. Носальская

Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского университета путей сообщения, г. Чита, Российская Федерация

✉kapvs@mail.ru

Резюме

Известны три основных метода кинематического анализа механизмов: аналитический, графоаналитический (метод планов) и графический (метод кинематических диаграмм). Наиболее точным считается первый, менее точным – второй, самым неточным – третий. Именно поэтому при исследовании механизмов графический метод применяется реже всего. Высокая погрешность метода вызвана прежде всего низкой точностью построения графиков, которая обусловлена обычно вычерчиванием графиков вручную. Однако в современных условиях при использовании конструкторских систем автоматизированного проектирования точность метода может быть повышена. В статье сделана попытка оценки точности графического метода на примере анализа кинематики двух плоских рычажных механизмов. Исследование механизмов проводилось с построением их упрощенных параметризованных кинематических схем в среде CAD-системы «Компас» и с приведением в движение (анимацией) упрощенных параметризованных кинематических схем с помощью специального программного продукта – CAD-Animator'a. В результате получили координаты точек движущихся звеньев, затем рассчитали скорости и ускорения звеньев. Эти же параметры (координаты, скорости и ускорения) были получены с помощью аналитического метода. После чего проводилось сравнение параметров, найденных графическим и аналитическим методами. Выяснилось, что в большинстве случаев графический метод дает вполне удовлетворительную точность, однако в некоторых вариантах ошибка определения параметров была значительной – около 50 %. В связи с этим даны отдельные рекомендации, например, уменьшение шага движения начального звена.

Ключевые слова

кинематический анализ, графический метод, CAD-система, оценка точности, аналитический метод, механизм

Для цитирования

Капшунов В.В. Оценка точности графического метода кинематического анализа с использованием анимационного моделирования в CAD-системе «Компас» / В.В. Капшунов, Т.Э. Носальская // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4 (84). С. 91–102. DOI 10.26731/1813-9108.2024.4(84).91-102.

Информация о статье

поступила в редакцию: 23.09.2024 г.; поступила после рецензирования: 26.11.2024 г.; принята к публикации: 27.11.2024 г.

Evaluation of the accuracy of the graphical method of kinematic analysis using animation modeling in the CAD system Kompas

V.V. Kapshunov ✉, T.E. Nosal'skaya

Trans-Baikal Institute of Railway Transport – a Branch of the Irkutsk State Transport University, Chita, the Russian Federation

✉kapvs@mail.ru

Abstract

There are three main methods of kinematic analysis of mechanisms – the analytical method, the graph-analytical method (the method of plans) and the graphical method (the method of kinematic diagrams). The analytical method is considered the most accurate, the plan method - less accurate, while the graphical method - the most inaccurate. Therefore, in the study of mechanisms, the latter method is used less often. The high error of the method is caused, first of all, by the low accuracy of plotting. Low accuracy usually results from drawing graphs manually. However, in modern conditions, when using computer-aided design systems, the accuracy of the method can be increased. In this article, an attempt is made to assess the accuracy of the graphical method by analyzing the kinematics of two flat lever mechanisms. The study of the mechanisms was carried out with the construction of their simplified parameterized kinematic schemes in the environment of the CAD system Kompas and with the setting in motion (animation) of the simplified parameterized kinematic schemes using a special software product - CAD-Animator. As a result, the coordinates of the points of the moving links were obtained, then the velocities and accelerations of the links were calculated. The same parameters (coordinates, velocities and accelerations) were obtained using the analytical method. After that, the parameters obtained by graphical and analytical methods were compared. As a result, it turned out that in most cases the graphical method gives quite satisfactory accuracy.

However, in some cases, the error in determining the parameters was significant – about 50%. In this regard, some recommendations are given, for example, reducing the step of movement of the initial link.

Keywords

kinematic analysis, graphical method, CAD system, accuracy assessment, analytical method, mechanism

For citation

Kashpunov V.V., Nosal'skaya T.E. Otsenka tochnosti graficheskogo metoda kinematicheskogo analiza s ispol'zovaniem animatsionnogo modelirovaniya v CAD-sisteme Kompas [Evaluation of the accuracy of the graphical method of kinematic analysis using animation modeling in the CAD system Kompas]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, No. 4(84), pp. 91–102. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.4(84).91-102.

Article Info

Received: September 23, 2024; Revised: November 26, 2024; Accepted: November 27, 2024.

Введение

При конструировании и исследовании механизмов применяют методы кинематического анализа – аналитический, графоаналитический (метод планов) и графический (метод кинематических диаграмм). Первый считается самым точным методом, а прочие – менее точными [1, 2].

Аналитический метод, в основе которого лежит вывод и использование различных математических зависимостей, устанавливающих связь между параметрами, характеризующими движение элементов механизмов, достаточно часто используется при кинематическом исследовании механизмов [3–8], в том числе и в учебном процессе [9].

Недостатком аналитического метода является сложность вывода указанных математических зависимостей и некоторая громоздкость их представления. Например, для сравнительно несложного кулисного механизма (рис. 1), ко-

торый исследовался в работе [4], была выведена на следующую формулу скорости скольжения кулисного камня по кулисе:

$$\vartheta_2 = \omega_1 l_1 \cos \left[\varphi_1 - \arctg \left(- \frac{\sin \varphi_1}{\lambda_4 - \cos \varphi_1} \right) - \arccos \frac{\lambda_2}{\sqrt{1 + \lambda_4^2 - 2\lambda_4 \cos \varphi_1}} \right].$$

Одно из достоинств метода планов – наглядное представление векторов скоростей и ускорений точек механизма: исследователи сразу видят их величину и направление. Использование современных CAD-систем дает возможность создавать интерактивные (анимированные) планы скоростей и ускорений [10–14]. Однако разработку анимированных планов нельзя назвать простой задачей.

Метод кинематических диаграмм традиционно считается методом, дающим наибольшую погрешность, прежде всего по причине

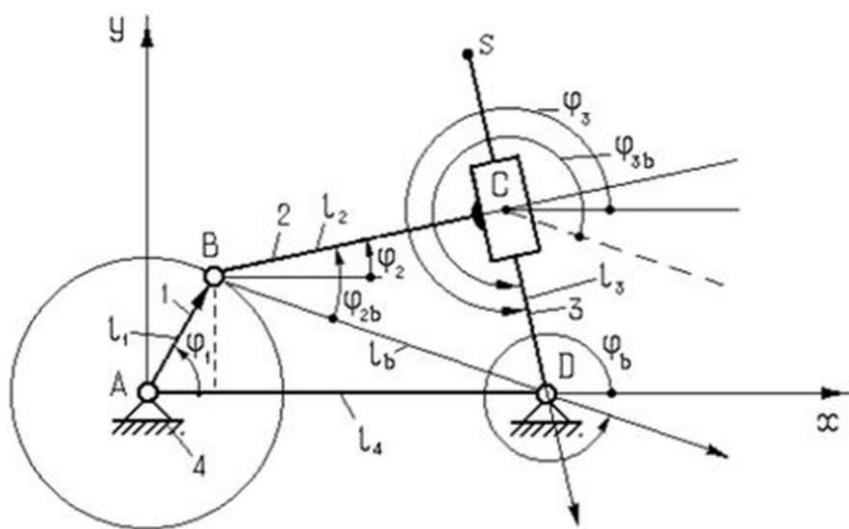


Рис. 1. Кулисный механизм
Fig. 1. The rocker mechanism

низкой точности построения графиков [1]. Однако низкая точность будет иметь место при выполнении графиков вручную [14], при использовании же CAD-систем погрешность может быть минимальна [2]. Графический метод также применяется при кинематическом исследовании механизмов [2, 15–17], хотя и не так широко.

В найденных авторами работах, где применялся графический метод кинематического анализа, количественно не оценивалась его погрешность (кроме работы [2], однако и здесь было просто указано, что числовые значения скоростей и ускорений, полученные графическим методом, с высокой точностью совпадают со значениями, полученными аналитическим методом). Целью данной статьи является проведение оценки точности метода кинематических диаграмм и выявление особенностей его применения при использовании CAD-системы «Компас».

Методология исследования

В данной работе исследования проводились на двух механизмах.

Первый – плоский кулисный механизм, кинематическая схема которого представлена на рис. 2 [18]. Исходные данные были следующими: $l_{AC} = l_2 = 40$ мм, $l_{AB} = l_1 = 70$ мм, $\omega_2 = 10,47$ рад/с ($n_2 = 100$ об/мин).

Кинематическое исследование механизма аналитическим методом выполнялось по [18]. Вычислялись координаты точки C , расстояние от центра вращения кулисы до центра кулисного камня C (l_4), скорость скольжения кулисного камня по кулисе V_{34} , угловая скорость кулисы

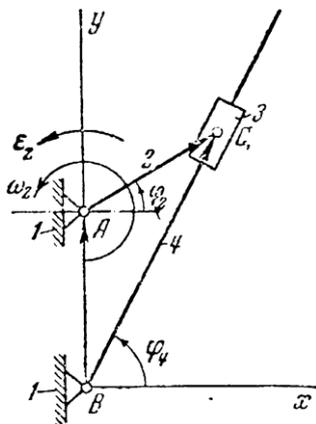


Рис. 2. Кинематическая схема кулисного механизма
Fig. 2. Kinematic scheme of the rocker mechanism

ω_4 , релятивное a_r и кориолисово a_c ускорения, а также угловое ускорение кулисы ϵ_4 .

Для графического метода кинематического анализа в CAD-системе «Компас» была создана упрощенная параметризованная кинематическая схема (УПКС) [19] (рис. 3).

Точка K на кулисе использовалась для определения угловой скорости кулисы.

Исследование механизма графическим методом производилось с использованием системы CAD-Animator версии 3, являющейся развитием CAD-Animator версии 2 [20, 21].

С помощью данной системы УПКС приводилась в движение и находились координаты точек C (X_C, Y_C) и K (X_K, Y_K), при этом анимация механизма (с определением координат точек) проводилась для шага угла поворота кривошипа $\Delta\varphi_2 1^\circ$ и 10° .

Параметры движения вычислялись по следующим формулам:

$$l_4 = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2}, \quad (1)$$

$$V_{34} = \frac{l_{4i+1} - l_{4i}}{\Delta t}, \quad (2)$$

где l_{4i+1}, l_{4i} – смежные значения параметра l_4 , а $\Delta t = \frac{\Delta\varphi_2}{\omega_2}$ – временной шаг (промежуток времени, который требуется кривошипу для поворота на угол $\Delta\varphi_2$);

где $\Delta X_K = X_{K_{i+1}} - X_{K_i}$, $\Delta Y_K = Y_{K_{i+1}} - Y_{K_i}$ – разность

$$\omega_4 = \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta X_K}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y_K}{\Delta t}\right)^2}}{l_{BK}},$$

где $\Delta X_K = X_{K_{i+1}} - X_{K_i}$, $\Delta Y_K = Y_{K_{i+1}} - Y_{K_i}$ – разность

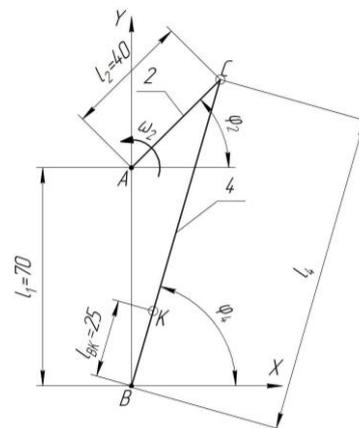


Рис. 3. Упрощенная параметризованная кинематическая схема кулисного механизма
Fig. 3. Simplified parameterized kinematic scheme of the rocker mechanism

смежных значений координат точки K ;

$$a_r = \frac{V_{34i+1} - V_{34i}}{\Delta t},$$

где V_{34i+1} , V_{34i} – смежные значения скорости скольжения камня по кулисе;

$$a_c = 2 \times V_{34\text{средн.}} \times \omega_{4\text{средн.}}, \quad (3)$$

где $V_{34\text{средн.}} = \frac{V_{34i+1} + V_{34i}}{2}$ – среднее значение

скорости скольжения; $\omega_{4\text{средн.}} = \frac{\omega_{34i+1} + \omega_{34i}}{2}$ –

среднее значение угловой скорости кулисы;

$$\varepsilon_4 = \frac{\omega_{4i+1} - \omega_{4i}}{\Delta t},$$

где ω_{4i+1} , ω_{4i} – смежные значения угловой скорости кулисы.

Поясним особенности расчета с использованием смежных и средних значений.

При вращении кривошипа меняются координаты точек C и K . Для каждого набора координат по формуле (1) можно рассчитать значение l_4 , (каждое значение l_4 соответствует своему значению обобщенной координаты φ_2 (табл. 1)).

Таблица 1. Координаты точек C и K при вращении кривошипа BC

Table 1. Coordinates of points C and K when crank BC rotates

X_C , мм	Y_C , мм	φ_2 , град. degrees	l_4 , мм
40	70	0	80,62257748
39,993908	70,698096	1	81,22643323
39,975633	71,39598	2	81,8256512
39,945181	72,093438	3	82,42015098
39,902562	72,790259	4	83,0098564

Два соседних значения l_4 будут являться смежными значениями параметра l_4 . Используя их, по формуле (2) определяем скорость скольжения кулисного камня по кулисе V_{34} . Принимаем, что каждое значение скорости скольжения из списка соответствует обобщенной координате, рассчитываемой по формуле:

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_{2i+1} + \varphi_{2i}}{2}, \quad (4)$$

где φ_{2i+1} , φ_{2i} – смежные значения угла поворота кривошипа, т.е. принимаем, что каждое значение скорости скольжения V_{34} соответствует среднему арифметическому смежных значений угла φ_2 (табл. 2).

Таблица 2. Величины скорости скольжения V_{34} при различных средних значениях углов φ_2
Table 2. Values of sliding velocity V_{34} at different average values of angles φ_2

φ_2 , град. degrees	V_{34} , мм/с
0,5	362,3134477
1,5	359,530781
2,5	356,6998702
3,5	353,8232509

Теперь, взяв смежные величины скорости скольжения из этого списка, можно вычислить средние значения скоростей скольжения, как показано в пояснении к формуле (3). При этом каждое значение средней скорости скольжения будет соответствовать уже другой величине угла φ_2 , которая также рассчитывается по формуле (4) (табл. 3).

Таблица 3. Величины средней скорости скольжения V_{34} при различных средних значениях углов φ_2
Table 3. Values of the average sliding velocity V_{34} for different average values of angles φ_2

φ_2 , град. degrees	V_{34} , мм/с
1	360,9221144
2	358,1153256
3	355,2615605
4	352,361727
...	...

Аналогичным образом, рассчитывая средние значения угловой скорости кулисы ω_4 по формуле (3), можем найти величины кориолисова ускорения для каждого угла φ_2 из приведенного списка.

Таким образом, мы связываем обобщенную координату φ_2 и какой-либо параметр, и это позволяет затем сравнить результаты аналитического и графического методов (определение значения параметра ведется для одной и той же величины угла φ_2).

Ошибка графического метода E (в процентах) рассчитывалась по формуле:

$$E = \frac{P_{\text{гр}} - P_a}{P_a} \cdot 100\%,$$

где $P_{\text{гр}}$ – значение параметра, полученное графическим методом; P_a – значение параметра, полученное аналитическим методом.

Второй исследуемый механизм – плоский рычажный механизм из работы [22] (рис. 4).

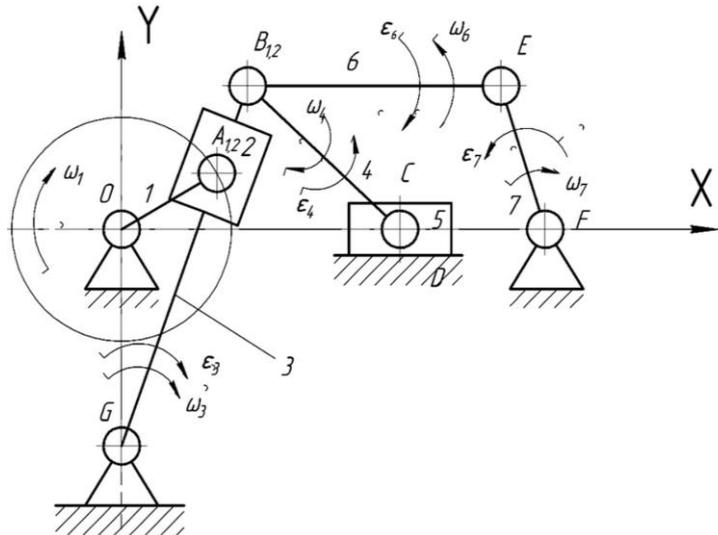


Рис. 4. Плоский рычажный механизм
Fig. 4. Flat lever mechanism

В работе указаны следующие геометрические параметры звеньев и параметры движения механизма: $l_{OA} = 0,1716$ м; $l_{OG} = 0,4679$ м; $l_{GB} = 0,8342$ м; $l_{BC} = 0,5179$ м; $l_{BE} = 0,54$ м; $l_{EF} = 0,3013$ м; $\omega_1 = 4$ рад/с; $\varepsilon_1 = 0$ рад/с². Угол φ_1 в этой работе был принят равным $38,117^\circ$, и все расчеты в ней производились только для данного значения.

Аналитическим методом определялись следующие параметры: координаты точек A, B, C, E (соответственно $X_A, Y_A, X_B, Y_B, X_C, Y_C, X_E, Y_E$); расстояние от центра вращения кулисы до центра кулисного камня l_{GA} ; скорость конечной точки кривошипа A_1 (V_{A_1}); скорость скольжения камня по кулисе $V_{A_3A_1}$; скорость точки кулисы V_{A_3} ; угловая скорость кулисы ω_3 ; скорость точек C и E (соответственно V_C и V_E); релятивное (относительное) ускорение $a_{A_{32r}}$; кориолисово ускорение $a_{A_{32c}}$; нормальное ускорение $a_{A_{3n}}$; угловое ускорение кулисы ε_3 ; ускорения точек B, C, E (соответственно a_B, a_C, a_E).

Анализ систем уравнений в [22] показал, что некоторые из них требуют изменения с целью оптимизации расчетов и исправления ошибок.

Измененные системы уравнений (в матричном виде) приведены ниже:

– система уравнений для определения скоростей V_C и V_{CB} :

$$\begin{pmatrix} -1 & \sin \psi \\ 0 & \cos \psi \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} V_C \\ V_{CB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{B_{3x}} \\ V_{B_{3y}} \end{pmatrix};$$

– система уравнений для определения скоростей V_E и V_{EB} :

$$\begin{pmatrix} \sin \gamma & -\cos \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) \\ \cos \gamma & -\sin \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} V_{EB} \\ V_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -V_{B_{3x}} \\ -V_{B_{3y}} \end{pmatrix};$$

– система уравнений для определения релятивного $a_{A_{32r}}$ и тангенциального $a_{A_{32t}}$ ускорений:

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_{A_{3t}} & \sin \varphi_2 \\ \sin \alpha_{A_{3t}} & \cos \varphi_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_{A_{3t}} \\ a_{A_{32r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -P_{r_x} \\ -P_{r_y} \end{pmatrix};$$

– система уравнений для определений тангенциального a_{CBt} и полного a_C ускорений точки C :

$$\begin{pmatrix} -1 & -\sin \psi \\ 0 & -\cos \psi \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_C \\ a_{CBt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{r_x} \\ P_{r_y} \end{pmatrix};$$

– уравнения для определения тангенциальных ускорений точки E относительно точек B и F :

$$\begin{pmatrix} -\sin \gamma & \sin \delta \\ -\cos \gamma & \cos \delta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_{EBt} \\ a_{EFt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{r_x} \\ P_{r_y} \end{pmatrix}.$$

Дальнейшие расчеты проводились с использованием измененных систем уравнений.

На рис. 5 изображена УПКС данного механизма с обозначениями.

Анимация УПКС выявила проблему – кривошип механизма при заданных геометрических параметрах не мог совершить полного оборота, поэтому для моделирования (с угловым шагом $\Delta\varphi_1 = 10^\circ$) были приняты значения углов поворота $60^\circ \dots -70^\circ$. Диапазон поворота кривошипа показан на рис. 5.

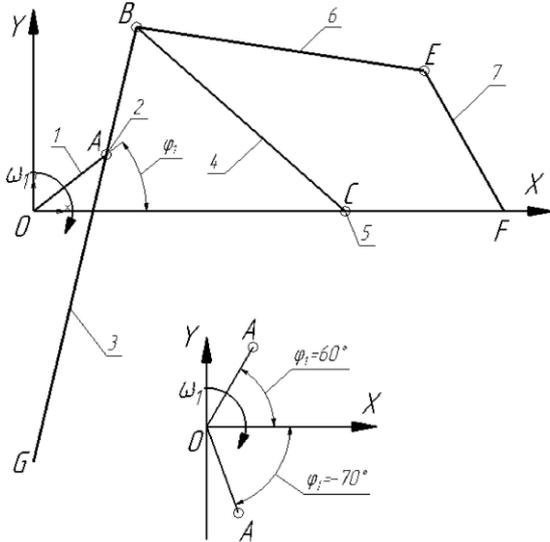


Рис. 5. Упрощенная параметризованная кинематическая схема плоского рычажного механизма
Fig. 5. Simplified parameterized kinematic scheme of a flat lever mechanism

Координаты точек A , B , C , E определялись с помощью программы CAD-Animator. Остальные параметры находились расчетным путем по формулам, приведенным ниже:

$$l_{GA} = \sqrt{X_A^2 + (Y_A + l_{OG})^2},$$

$$V_{A_1} = \sqrt{V_{A_1x}^2 + V_{A_1y}^2},$$

где V_{A_1x} – скорость точки A_1 по оси X , а V_{A_1y} – скорость точки A_1 по оси Y ;

$$V_{A_1x} = \frac{X_{A_{i+1}} - X_{A_i}}{\Delta t}, \quad V_{A_1y} = \frac{Y_{A_{i+1}} - Y_{A_i}}{\Delta t},$$

где $X_{A_{i+1}}$, X_{A_i} , $Y_{A_{i+1}}$, Y_{A_i} – смежные значения координат точки A , $\Delta t = \frac{\Delta\varphi_1}{\omega_1}$ – временной шаг;

$$V_{A_3A_1} = \frac{l_{GA_{i+1}} - l_{GA_i}}{\Delta t},$$

где $l_{GA_{i+1}}$, l_{GA_i} – смежные значения параметра l_{GA} ;

$$V_{A_3} = \sqrt{V_{A_1}^2 - V_{A_3A_2}^2},$$

$$\omega_3 = \frac{V_{A_3}}{l_{GA_{\text{средн.}}}},$$

где $l_{GA_{\text{средн.}}}$ – среднее значение параметра l_{GA} ;

$$V_C = \sqrt{V_{C_x}^2 + V_{C_y}^2},$$

где V_{C_x} – скорость точки C по оси X , а V_{C_y} – скорость точки C по оси Y ;

$$V_{C_x} = \frac{X_{C_{i+1}} - X_{C_i}}{\Delta t}, \quad V_{C_y} = \frac{Y_{C_{i+1}} - Y_{C_i}}{\Delta t},$$

где $X_{C_{i+1}}$, X_{C_i} , $Y_{C_{i+1}}$, Y_{C_i} – смежные значения координат точки C ;

$$V_E = \sqrt{V_{E_x}^2 + V_{E_y}^2};$$

где V_{E_x} – скорость точки E по оси X , а V_{E_y} – скорость точки E по оси Y ;

$$V_{E_x} = \frac{X_{E_{i+1}} - X_{E_i}}{\Delta t}, \quad V_{E_y} = \frac{Y_{E_{i+1}} - Y_{E_i}}{\Delta t},$$

где $X_{E_{i+1}}$, X_{E_i} , $Y_{E_{i+1}}$, Y_{E_i} – смежные значения координат точки E ;

$$a_{A_{32r}} = \frac{V_{A_3A_{i+1}} - V_{A_3A_i}}{\Delta t},$$

где $V_{A_3A_{i+1}}$, $V_{A_3A_i}$ – смежные значения скорости $V_{A_3A_1}$;

$$a_{A_{32c}} = 2 \cdot \omega_{\text{средн.}} \cdot V_{A_3A_{\text{средн.}}},$$

где $\omega_{\text{средн.}}$ – среднее значение угловой скорости кулисы, а $V_{A_3A_{\text{средн.}}}$ – среднее значение скорости $V_{A_3A_1}$;

$$a_{A_3n} = \omega_{\text{средн.}}^2 \cdot l_{GA_{\text{средн.}}},$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\omega_{3i+1} - \omega_{3i}}{\Delta t},$$

где ω_{3i+1} , ω_{3i} – смежные значения угловой скорости кулисы;

$$a_B = l_{GB} \cdot \sqrt{\left(\omega_{\text{средн.}}^2\right)^4 + \varepsilon_3^2},$$

$$a_C = \sqrt{a_{C_x}^2 + a_{C_y}^2},$$

где a_{C_x} , a_{C_y} – ускорение точки C по осям X и Y ;

$$a_{C_x} = \frac{V_{C_{x_{i+1}}} - V_{C_{x_i}}}{\Delta t}, \quad a_{C_y} = \frac{V_{C_{y_{i+1}}} - V_{C_{y_i}}}{\Delta t},$$

где $V_{C_{x_{i+1}}}$, $V_{C_{x_i}}$, $V_{C_{y_{i+1}}}$, $V_{C_{y_i}}$ – смежные значения скорости точки C по осям системы координат;

$$a_E = \sqrt{a_{E_x}^2 + a_{E_y}^2},$$

где a_{E_x} , a_{E_y} – ускорение точки E по осям X и Y ;

$$a_{E_x} = \frac{V_{E_{x_{i+1}}} - V_{E_{x_i}}}{\Delta t}, \quad a_{E_y} = \frac{V_{E_{y_{i+1}}} - V_{E_{y_i}}}{\Delta t},$$

где $V_{E_{x_{i+1}}}$, $V_{E_{x_i}}$, $V_{E_{y_{i+1}}}$, $V_{E_{y_i}}$ – смежные значения скорости точки E по осям системы координат.

Смежные и средние значения параметров определялись аналогично тому, как это выполнялось для кулисного механизма.

Ошибка графического метода E (в процентах) для данного механизма рассчитывалась по формуле:

$$E = \frac{|P_{\text{гр}}| - |P_{\text{а}}|}{|P_{\text{а}}|} \cdot 100\%,$$

где $|P_{\text{гр}}|$ – абсолютное (беззнаковое) значение параметра, полученное графическим методом;

$|P_{\text{а}}|$ – абсолютное (беззнаковое) значение параметра, полученное аналитическим методом.

Расчеты выполнялись в табличном процессоре Microsoft Excel.

Результаты исследования

Сначала исследование было выполнено для кулисного механизма.

На первом этапе моделирование проводилось для шага угла поворота кривошипа $\Delta\varphi_2 = 1^\circ$. На рис. 6 показаны графики ошибок.

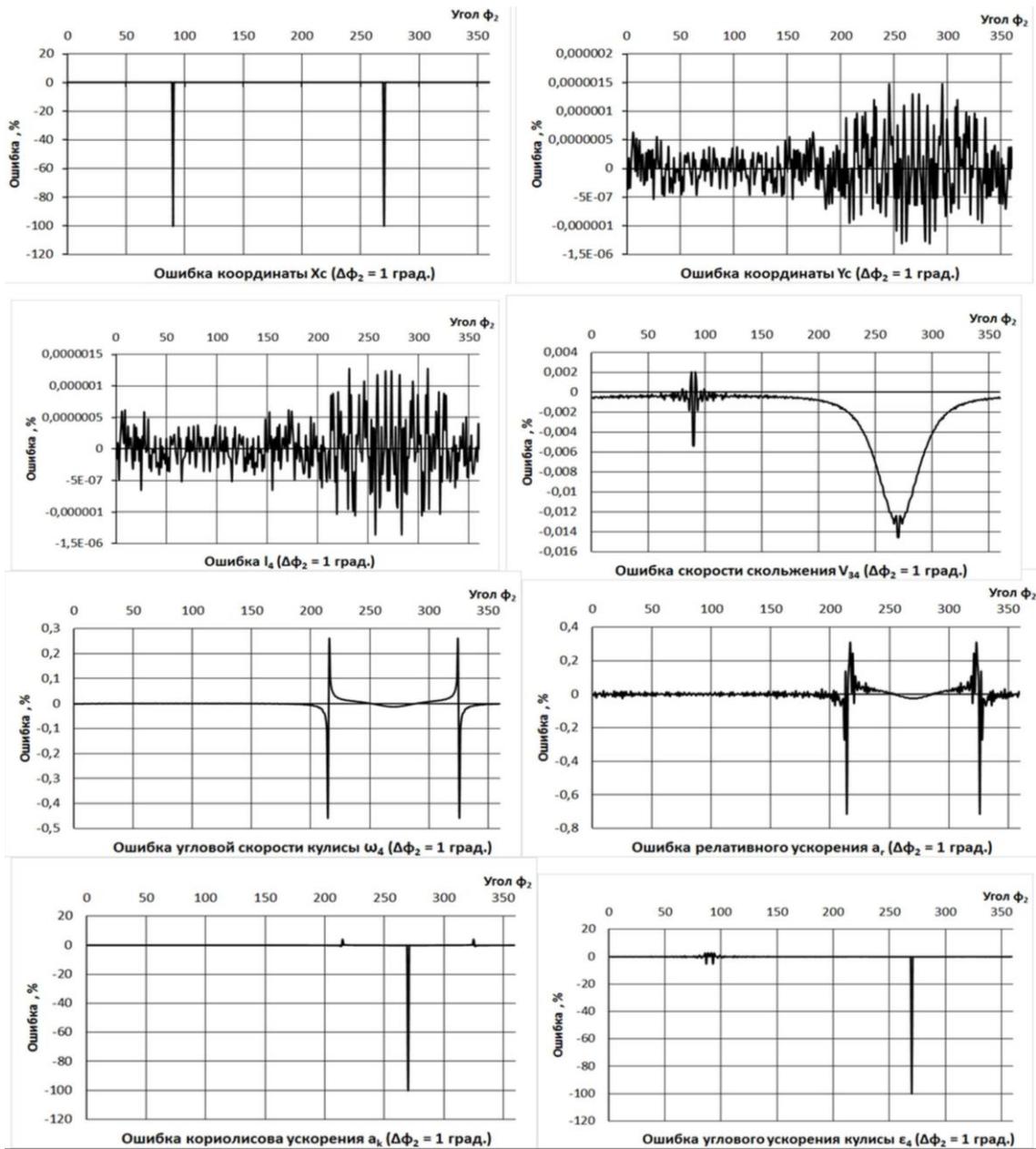


Рис. 6. Графики ошибок (кулисный механизм, $\Delta\varphi_2 = 1^\circ$)

Fig. 6. Error graphs (rocker mechanism, $\Delta\varphi_2 = 1^\circ$)

Анализ рассчитанных величин ошибок показал, что для $\Delta\varphi_2 = 1^\circ$ величина ошибок достаточно мала (десятые доли процента и меньше). Однако в некоторых случаях ошибка (без учета знака) достигала 100 % (например, ошибка углового ускорения при угле поворота кривошипа, равном 270°). Это было связано с тем, что параметр $P_{\text{тр}}$ здесь принимал нулевое значение. Очевидно, что в математическом и физическом смысле такие значения ошибки можно считать выбросом и не принимать во внимание.

Затем моделирование проводилось для шага угла поворота кривошипа $\Delta\varphi_2 = 10^\circ$. В этом случае ошибки в среднем увеличились, максимальная их величина достигла примерно 12,5 % (для кориолисова ускорения). Также имели место:

- выбросы, вызванные нулевым значением параметра $P_{\text{тр}}$;
- ошибки деления на ноль (здесь P_a равнялся нулю) – фактически это тоже выбросы.

Для угла поворота кривошипа равного 215° и 325° ошибка угловой скорости кулисы ω_4 достигла 101,7 %. Это связано с тем, что величины $P_{\text{тр}}$ и P_a здесь были довольно небольшими: так, для $\varphi_2 = 215^\circ$, $P_a = -0,019154266$ рад/с, $P_{\text{тр}} = -0,038646322$ рад/с. Соответственно, даже небольшая разность этих величин при делении на

P_a дает довольно большое число. Это необходимо принимать во внимание при использовании графического метода кинематического анализа. В принципе такие ошибки также можно считать выбросами.

Следовательно, при анимации УПКС (с получением координат точек механизма) угловой шаг поворота кривошипа для данного механизма можно принять равным 10° без большой потери точности.

На втором этапе исследование проводилось для плоского рычажного механизма (с шагом угла поворота кривошипа 10°).

На рис. 7 показаны графики ошибок некоторых параметров (здесь ошибки достигали максимальных значений). Определим причины больших ошибок.

Ошибки нормального и кориолисова ускорений достигают наибольших величин при $\varphi_2 = -20^\circ$, в этот момент кулиса меняет направление своего вращения и ее угловая скорость минимальна. Соответственно величины указанных ускорений также будут минимальны, что и обуславливает большую ошибку; причина здесь та же, что и в предыдущем случае – минимальное значение ускорений, рассчитанных аналитическим методом. Это можно считать выбросом.

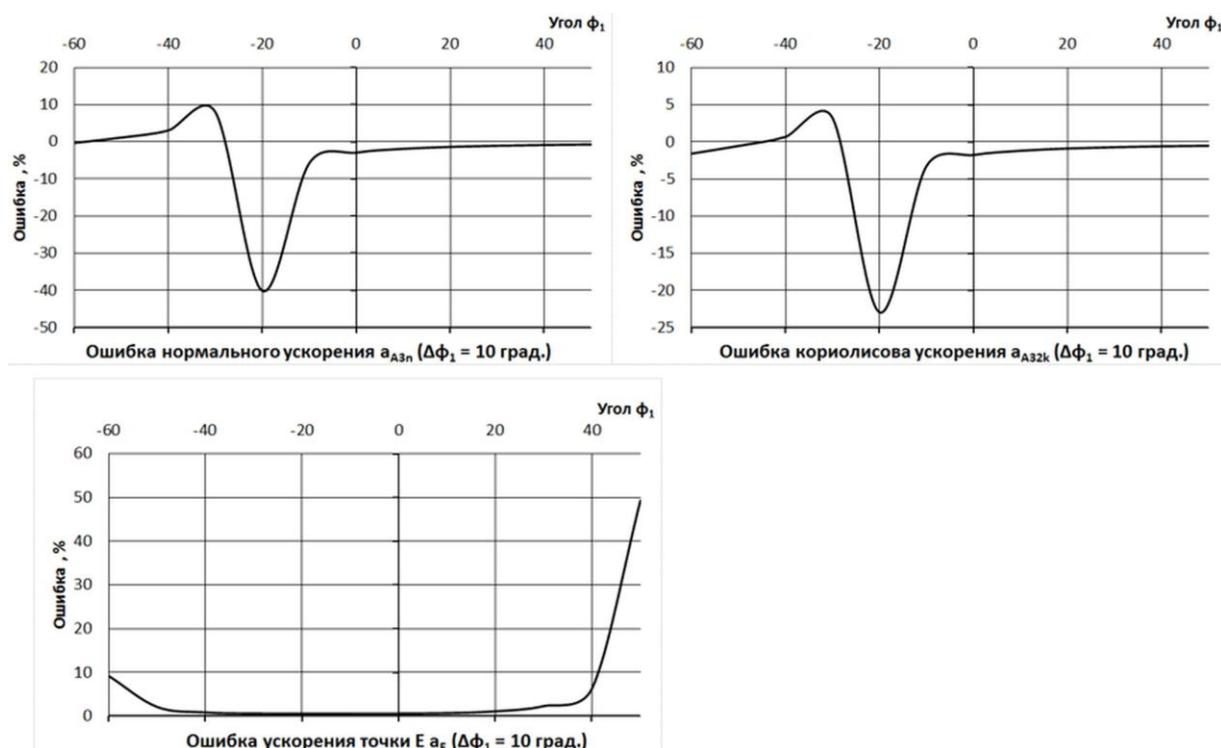


Рис. 7. Графики ошибок (плоский рычажный механизм, $\Delta\varphi_1 = 10^\circ$)

Fig. 7. Error graphs (flat lever mechanism, $\Delta\varphi_1 = 10^\circ$)

Самая большая ошибка имеет место быть при определении ускорения точки E (49,284 %). Представляется, что основная причина заключается в сильном смещении точки E по траектории движения при повороте кривошипа на угловой шаг. Это хорошо иллюстрирует рис. 8.

Дополнительно была проведена анимация (с определением координат точек и расчетами по

графическому методу) УПКС данного механизма с шагом $\Delta\varphi_2 = 1^\circ$. При этом выяснилось, что:

– ошибка определения нормального и кориолисова ускорений уменьшилась примерно до 1,4 %;

– ошибка определения ускорения точки E уменьшилась до 14,76 % (рис. 9).



Рис. 8. Траектория движения точки E
Fig. 8. The trajectory of the point E

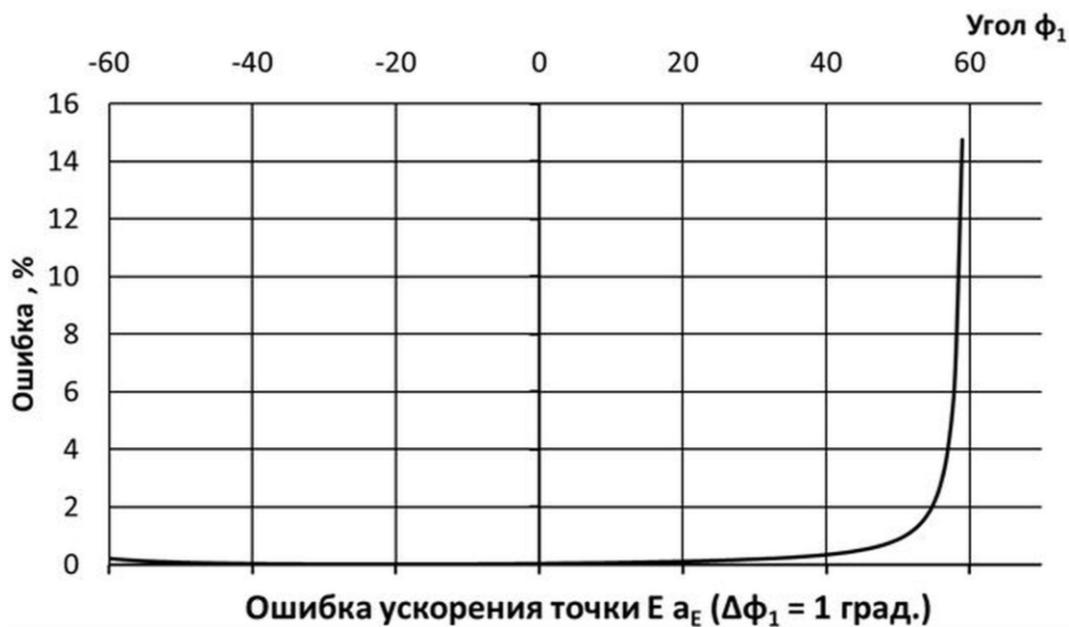


Рис. 9. График ошибок ускорения точки E (плоский рычажный механизм, $\Delta\varphi_1 = 1^\circ$)
Fig. 9. Graph of acceleration errors of point E (flat lever mechanism, $\Delta\varphi_1 = 1^\circ$)

Заключение

По итогам исследования сделаем выводы:

– графический метод кинематического анализа можно применять при исследовании плоских рычажных механизмов;

– точность графического метода вполне приемлема;

– при проведении моделирования необходимо с особой тщательностью подходить к выбору шага изменения положения начального звена (очевидно, что лучше брать меньший шаг);

– можно провести несколько предварительных этапов моделирования (с разными шагами) и выбрать лучший вариант, исходя из

возможностей компьютера и точности определения параметров;

– для предварительной оценки ошибки определения параметров можно использовать полученные промежуточные точки траекторий (чем они ближе друг к другу, тем лучше, причем рассматривать лучше точки на звеньях, наиболее удаленных от начального звена).

Также можно отметить, что анимация кинематических схем позволяет выявить ошибки в конструкции механизмов (можно, например, проверить, имеет ли возможность рассматриваемое звено механизма двигаться в заданном диапазоне).

Список литературы

1. Беляев А.Н., Шередкин В.В., Василенко С.В. Оценка точности и достоверности результатов в курсовом проекте по «Теория механизмов и машин» // Актуальные направления развития научных исследований для эффективного развития АПК : материалы междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2020. Ч. II. С. 229–232.
2. Никифоров Н.В. Сравнение точности различных методов кинематического анализа механизмов с применением ЭВМ // Традиции и инновации в развитии АПК : междунар. науч.-практ. конф. Великие Луки, 2019. С. 468–471.
3. Эльяш Н.Н., Незамаева Н.О. Проектирование механизма шагового транспортера // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. 2021. № 1 (9). С. 54–58.
4. Кинематический анализ кулисного механизма / Ж.Ш. Токтакунов, К.Ж. Зиялиев, Д.К. Аканов и др. // Изв. Кыргызск. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. 2020. № 3 (55). С. 152–158.
5. Хадашов М.Л., Несмиянов Л.И., Карева Н.В. Кинематический анализ механизма поворота стрелы погрузочного манипулятора // Современные научные исследования и инновации. 2020. № 7 (111). URL : https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43924300_95958077.pdf (Дата обращения 19.09.2024).
6. Определение кинематических параметров шарнирно-четырёхзвенного механизма / К.Ж. Зиялиев, А.Б. Такырбашев, О.К. Чинбаев и др. // Современные проблемы теории машин. 2020. № 9. С. 17–21.
7. Zhauyt A., Azilkiyasheva M. The kinematic analysis of the mechanisms of sewing machine // Вестн. Алматин. ун-та энергетики и связи. 2020. № 4 (51). Р. 155–163.
8. Кинематический и силовой анализ механизма привода двухстанной очистки зерноуборочного комбайна / Д.А. Дубовик, В.И. Прибыльский, А.А. Новиков и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 6. С. 78–90.
9. Кутеева Г.А. Лабораторный практикум «Кинематический анализ механизмов» на примере исторических моделей из коллекций СПбГУ // Вторая межрегион. науч.-практ. конф. преподавателей математики и физики под девизом «Математика – это просто!» : материалы конф. СПб., 2019. С. 122–137.
10. Капшунов В.В., Коростелева М.В. Параметризованные планы скоростей плоских рычажных механизмов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. Т. 1. С. 446–449.
11. Дворников Л.Т., Иванов М.С. К вопросу о применении в технике сложных, многозвенных групп Ассура // Современные проблемы теории машин. 2020. № 9. С. 22–25.
12. Дворников Л.Т., Мажарин А.В., Худжаев У.О. Кинематический анализ кривошипно-ползунного механизма прессы // Современные проблемы теории машин. 2019. № 7. С. 19–22.
13. Шматкова А.В., Умаров А.Р., Хамитов Ф.Р. Кинематический анализ плоских рычажных механизмов с гидро- и пневмоприводом // Молодежный вестник ИрГТУ. 2017. № 1. URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29411808> (Дата обращения 19.09.2024).
14. Жукова Е.В., Жуков И.А., Кеплина К.В. Автоматизированные компьютерные технологии решения прикладных задач теории механизмов и машин // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2015. № 3. С. 59–68.
15. Просеков А.Е. Применение математических методов в кинематическом анализе механизмов двигателей автомобилей // Техника и технологии строительства. 2016. № 3 (7). С. 35–41.
16. Киреев С.О., Кадеров Х.К., Заикин В.П. Автоматизированное построение диаграмм кинематических параметров шатунно-крейцкопфного механизма // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2018. № 3 (62). С. 41–46.
17. Киреев С.О., Кадеров Х.К., Заикин В.П. Автоматизированное построение диаграмм кинематических параметров центра масс шатуна привода плунжерного насоса // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2019. № 1 (64). С. 29–36.
18. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. М. : Наука, 1988. 640 с.
19. Капшунов В.В. Упрощенные параметризованные кинематические схемы в учебном процессе // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2022. № 1 (45). С. 95–102.
20. Капшунов В.В. Программная система анимации кинематических схем механизмов // Образование – наука – производство : материалы III Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2019. Т. 2. С. 177–181.

21. Свидетельство № 2021610231 Российская Федерация. CAD-Animator (версия 2.0) / В.В. Капшунув ; заявитель и правообладатель ИрГУПС. № 2020666576 ; заявл. 14.12.2020 ; опублик. 12.01.2021. 1 с.

22. Горшков А.Д., Примостка В.Е. Применение аналитического метода в кинематическом анализе плоских многозвенных механизмов // European Research. 2015. № 8 (9). С. 6–17.

References

1. Belyaev A.N., Sheredekin V.V., Vasilenko S.V. Otsenka tochnosti i dostovernosti rezul'tatov v kursovom proekte po «Teoriya mekhanizmov i mashin» [Assessment of accuracy and reliability of results in the course project on «Theory of mechanisms and machines»]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy dlya effektivnogo razvitiya APK»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Current directions of scientific research for the effective development of agriculture complex»]. Voronezh, 2020, part II, pp. 229–232.

2. Nikiforov N.V. Sravnenie tochnosti razlichnykh metodov kinematicheskogo analiza mekhanizmov s primeneniem EVM [Comparing the accuracy of various methods of kinematic analysis of mechanisms using computers]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Traditsii i innovatsii v razvitiy APK»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Traditions and innovations in the development of agriculture complex»]. Velikie Luki, 2019, pp. 468–471.

3. El'yash N.N., Nezamaeva N.O. Proektirovanie mekhanizma shagovogo transportera [Designing a stepper conveyor mechanism]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik: Tekhnicheskie sistemy v APK* [Scientific and technical bulletin: Technical systems in agriculture complex], 2021, no 1(9), pp. 54–58.

4. Toktakunov J.Sh., Zhiyaliev K.Zh., Akanov D.K., Takyrbashev A.B. Kinematicheskii analiz kulisnogo mekhanizma [Kinematic analysis of the rocker mechanism]. *Izvestiya Kirgizskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova* [Bulletins of the Kirgiz State Technical University named after I. Razzakov], 2020, no 3 (55), pp. 152–158.

5. Khadashov M.L., Nesmeyanova L.I., Kareva N.V. Kinematicheskii analiz mekhanizma povorota strely pogruzochnogo manipulyatora [Kinematic analysis of the boom rotation mechanism of the loading manipulator]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern scientific research and innovation], 2020, no 7 (111). Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43924300_95958077.pdf (Accessed September 19, 2024).

6. Zalyaliev K.Zh., Takyrbashev A.B., Chinbaev O.K., Dyushembaev Zh.Zh. Opredelenie kinematicheskikh parametrov sharnirno-chetyrekhzvennogo mekhanizma [Determination of kinematic parameters of a four-link hinge mechanism]. *Sovremennye problemy teorii mashin* [Modern problems of machine theory], 2020, no 9, pp. 17–21.

7. Zhauyt A., Azilkiyasheva M. The kinematic analysis of the mechanisms of sewing machine. *Vestnik Almatinskogo universiteta energetiki i svyazi* [Bulletin of the Almaty University of Energy and Communications], 2020, no 4 (51), pp. 155–163.

8. Dubovik D.A., Pribyl'skii V.I., Novikov A.A., Vyrskii A.N. Kinematicheskii i silovoi analiz mekhanizma privoda dvukhstannoi ochistki zernouborochnogo kombaina [Kinematic and power analysis of the drive mechanism of two-stage cleaning of a combine harvester]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability], 2019, no 6, pp. 78–90.

9. Kuteeva G.A. Laboratornyi praktikum «Kinematicheskii analiz mekhanizmov» na primere istoricheskikh modelei iz kolleksii SPbGU [Laboratory workshop «Kinematic analysis of mechanisms» on the example of historical models from the collections of St. Petersburg State University]. *Materialy Vtoroi mezhhregional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii prepodavatelei matematiki i fiziki pod devizom «Matematika – eto prosto!»* [Proceedings of the Second Interregional Scientific and Practical Conference of Teachers of Mathematics and Physics under the motto «Mathematics is simple!»]. Saint Petersburg, 2019, pp. 122–137.

10. Kapshunov V.V., Korosteleva M.V. Parametrizovannye plany skorostei ploskikh rychazhnykh mekhanizmov [Parameterized velocity plans of flat lever mechanisms]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «Transport Infrastructure of the Siberian Region»]. Irkutsk, 2018, Vol. 1, pp. 446–449.

11. Dvornikov L.T., Ivanov M.S. K voprosu o primeneni v tekhnike slozhnykh, mnogozvennykh grupp Assura [On the issue of the application of complex, multi-link Assur's groups in technology]. *Sovremennye problemy teorii mashin* [Modern problems of machine theory], 2020, no 9, pp. 22–25.

12. Dvornikov L.T., Mazharin A.V., Khudzhaev U.O. Kinematicheskii analiz krivoshipno-polzunnogo mekhanizma pressa [Kinematic analysis of the crank-slide mechanism of the press]. *Sovremennye problemy teorii mashin* [Modern problems of machine theory], 2019, no 7, pp. 19–22.

13. Shmatkova A.V., Umarov A.R., Khamitov F.R. Kinematicheskii analiz ploskikh rychazhnykh mekhanizmov s gidro- i pnevmoprivodom [Kinematic analysis of flat lever mechanisms with hydro and pneumatic drive]. *Molodezhnyi vestnik IrGTU* [Youth Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2017, no 1. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29411808> (Accessed September 19, 2024).

14. Zhukova E.V., Zhukov I.A., Keplina K.V. Avtomatizirovannye komp'yuternye tekhnologii resheniya prikladnykh zadach teorii mekhanizmov i mashin [Automated computer technologies for solving applied problems of the theory of mechanisms and machines]. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroeni* [Computer-aided design in mechanical engineering], 2015, no 3, pp. 59–68.

15. Prosekov A.E. Primenenie matematicheskikh metodov v kinematicheskoy analize mekhanizmov dvigatelya avtomobilei [Application of mathematical methods in kinematic analysis of mechanisms of automobile engines]. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva* [Technique and technologies of construction], 2016, no 3 (7), pp. 35–41.

16. Kireev S.O., Kaderov Kh.K., Zaikin V.P. Avtomatizirovannoe postroenie diagramm kinematicheskikh parametrov shatunno-kreitskopfnogo mekhanizma [Automated diagramming of kinematic parameters of a connecting rod-crosshead mechanism]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya* [Progressive technologies and systems of mechanical engineering], 2018, no 3 (62), pp. 41–46.

17. Kireev S.O., Kaderov Kh.K., Zaikin V.P. Avtomatizirovannoe postroenie diagramm kinematicheskikh parametrov tsentra mass shatuna privoda plunzhernogo nasosa [Automated diagramming of kinematic parameters of the center of mass of the connecting rod of the plunger pump drive]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya* [Progressive technologies and systems of mechanical engineering], 2019, no 1 (64), pp. 29–36.

18. Artobolevskii I.I. Teoriya mekhanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines]. Moscow: Nauka Publ., 1988. 640 p.

19. Kapshunov V.V. Uproshchennye parametrizovannye kinematicheskie skhemy v uchebnom protsesse [Simplified parameterized kinematic schemes in the educational process]. *Professional'noe obrazovanie v Rossii i za rubezhom* [Professional education in Russia and abroad], 2022, no 1 (45), pp. 95–102.

20. Kapshunov V.V. Programmnyaya sistema animatsii kinematicheskikh skhem mekhanizmov [Program system of animation of kinematic schemes of mechanisms]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – nauka – proizvodstvo»* [Proceedings of the III All-Russian scientific and practical conference «Education – science – production»]. Chita, 2019, Vol. 2, pp. 177–181.

21. Kapshunov V.V. Certificate of registration of the computer program 2021610231, 12.01.2021.

22. Gorshkov A.D., Primostka V.E. Primenenie analiticheskogo metoda v kinematicheskom analize ploskikh mnogozvennykh mekhanizmov [Application of the analytical method in the kinematic analysis of planar multi-link mechanisms]. *European Research*, 2015, no 8 (9), pp. 6–17.

Информация об авторах

Капиунов Вячеслав Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной механики и математики, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; e-mail: kapvs@mail.ru.

Носальская Татьяна Эдуардовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной механики и математики, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; e-mail: tenosalskaya@gmail.com.

Information about the authors

Vyacheslav V. Kapshunov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Mathematics, Trans-Baikal Institute of Railway Transport – a Branch of the Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: kapvs@mail.ru.

Tat'yana E. Nosal'skaya, Ph.D. in Physics and Mathematics Science, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Mathematics, Trans-Baikal Institute of Railway Transport – a Branch of the Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: tenosalskaya@gmail.com.

Вибродиагностика насосного оборудования тепловых электростанций

А.В. Лукьянов¹✉, Д.П. Алейников², А.П. Хоменко, В.А. Налётов²

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

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉loukian@inbox.ru

Резюме

В настоящей статье приведены результаты исследований в области комплексного анализа параметров вибрации, генерируемой при работе промышленных центробежных насосов, эксплуатируемых в условиях предприятий тепловых электростанций. Создан научный задел для разработки диагностических критериев оценки и прогнозирования процессов изменения технического состояния указанного насосного оборудования, использование которых на практике позволит оптимизировать процедуры диагностики и анализа вибрации и усовершенствовать действующую на предприятиях систему ремонтов. Особое внимание уделено изучению причин повышенной вибрации, таких как дисбаланс, износ подшипников, кавитация и др. Приведены результаты измерения вибрации на насосных агрегатах с использованием современной аппаратуры, рассмотрены способы диагностики развивающихся дефектов. В рамках настоящего исследования применялись итоги комплексного диагностического подхода к оценке вибрации, включая спектральный анализ в расширенном частотном и динамическом диапазоне, анализ огибающей исходного сигнала виброускорения. Полученные научные заключения подтверждают эффективность предложенного набора диагностических методов для анализа параметров вибрации насосных установок и создания критериев оценки и прогнозирования, а также свидетельствуют о возможности использования данных диагностических критериев для осуществления контроля за состоянием промышленных насосов и краткосрочного прогнозирования процессов их технической деградации с использованием адаптивных математических моделей. Исследование выявленных вибродиагностических дефектов позволяет определить и сконфигурировать автоматические стационарные средства технической диагностики, способствующие переходу от системы планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, которое является современным решением, соответствующим концепции «Индустрия 4.0», когда сложное технологическое оборудование объединяется в одну информационную сеть с возможностью передачи данных о своем техническом состоянии.

Ключевые слова

вибродиагностика, кавитация, вибрация, насосные агрегаты, обслуживание по фактическому состоянию

Для цитирования

Лукьянов А.В. Вибродиагностика насосного оборудования тепловых электростанций / А.В. Лукьянов, Д.П. Алейников, А.П. Хоменко, В.А. Налётов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4 (84). С. 103–116. DOI 10.26731/1813-9108.2024.4(84).103-116.

Информация о статье

поступила в редакцию: 09.12.2024 г.; поступила после рецензирования: 20.12.2024 г.; принята к публикации: 23.12.2024 г.

Vibration diagnostics of pumping equipment of thermal power plants

A.V. Luk'yanov¹✉, D.P. Aleinikov², A.P. Khomenko, V.A. Naletov²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉loukian@inbox.ru

Abstract

This article presents the results of research in the field of complex analysis of vibration parameters generated during operation of industrial centrifugal pumps operated in thermal power plants. A scientific basis has been created for developing diagnostic criteria for assessing and predicting the processes of change in the technical condition of pumping equipment in operation, which, when used in practice, will optimize the procedures for diagnostics and vibration analysis and improve the repair system in place at enterprises. Particular attention is paid to the analysis of the causes of increased vibration, such as imbalance, bearing wear, cavitation and other defects. The results of vibration measurements on pumping units using modern equipment are presented, and methods for diagnosing the developing defects are considered. In this study, the results of a complex diagnostic approach to vibration analysis were used, including spectral analysis in an extended frequency and dynamic range, and analysis of the envelope of the original vibration acceleration signal. The obtained scientific results confirm the effectiveness of the proposed set of diagnostic methodologies for analyzing the vibration parameters of pumping units and creating criteria for assessment and forecasting. The obtained results indicate the possibility of using diagnostic criteria to monitor the condition of industrial pumps and short-term forecasting of degradation processes of their technical condition using adaptive mathematical models. Analysis of the identified vibration diagnostic defects allows us to

determine and configure automatic stationary technical diagnostics tools that facilitate the transition from a system of scheduled preventive maintenance to maintenance based on the actual condition. Maintenance based on the actual condition is a modern solution that corresponds to the concept of «Industry 4.0», in which complex technological equipment is united into a single information network with the ability to transmit data on its technical condition.

Keywords

vibration diagnostics, cavitation, vibration, pump units, maintenance based on actual condition

For citation

Luk'yanov A.V., Aleinikov D.P., Khomenko A.P., Naletov V.A. Vibrodiagnostika nasosnogo oborudovaniya teplovykh elektrostantsii [Vibration diagnostics of pumping equipment of thermal power plants]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, No. 4(84), pp. 103–116. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.4(84).103-116.

Article info

Received: December 9, 2024; Revised: December 20, 2024; Accepted: December 23, 2024.

Введение

Тепловая электростанция (ТЭЦ) является ключевым звеном в производстве электроэнергии, и эффективная работа ее оборудования имеет решающее значение для непрерывной подачи электроэнергии. Одним из важнейших элементов ТЭЦ является насосное оборудование, которое обеспечивает циркуляцию теплоносителя и других рабочих жидкостей в системе. В условиях интенсивной эксплуатации насосное оборудование подвержено износу, поломкам и другим негативным воздействиям, которые могут привести к снижению производительности и аварийным ситуациям [1, 2]. При продолжительной работе в насосах любого типа происходит износ ротора и подшипников, в результате чего уровень вибрации всего насосного агрегата (НА), включающего и электродвигатель привода, увеличивается. [3, 4] Вертикальный асинхронный электродвигатель НА работает в условиях постоянной рабочей осевой и радиальной нагрузок и сопутствующих вибраций от насоса [5]. Износ ротора, лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата приводит к вихреобразованию, кавитациям и, как следствие, к повышению высокочастотной вибрации. Для своевременного выявления проблем эксплуатации и предотвращения аварий насосного оборудования ТЭЦ широко применяются методы и средства вибродиагностики [6–8].

Вибродиагностика машин и насосного оборудования ТЭЦ является одним из наиболее эффективных и достоверных способов определения его технического состояния [9–11]. Вибрационный контроль и диагностика развивающихся дефектов должна проводиться непрерывно во время эксплуатации НА. Это позволя-

ет выявить критические изменения уровня вибрации и принять меры для обнаружения и предупреждения развивающихся опасных дефектов насосного оборудования. В результате сокращаются затраты на ремонты и увеличивается срок межремонтной эксплуатации НА. Система вибродиагностики способна также определить качество самого ремонта и последующего монтажа насосов.

По частотному спектру вибрации можно выявить причину возникновения повышенной вибрации в механической, гидравлической или электрической частях насоса. Пиковые значения вибраций, влияющих на работоспособность агрегата, возникают на частотах, соответствующих виду дефекта [9, 10]. Они имеют характерные вибродиагностические признаки и могут выявляться путем анализа сигнала и спектра вибрации.

Основными причинами повышенной вибрации НА являются [9, 10]:

- дисбаланс, т.е. неравномерное распределение массы вращающихся частей насоса относительно оси вращения;
- износ или неисправность радиальных и осевых подшипников НА;
- электрические дефекты и замыкания в обмотках статора и обрывы стержней ротора асинхронного электропривода [12];
- механические повреждения и износ лопаток рабочего колеса насоса и его направляющего аппарата [13];
- износ и повреждение проточной части насоса, другие механические повреждения, вызывающие дополнительное вихреобразование или кавитации;
- неправильная установка НА, несоответствие параметров его работы паспортным харак-

теристикам, неправильная настройка оборудования, которые также могут привести к высоким вибрациям.

Применение вибродиагностики НА позволяет проводить обслуживание и ремонт оборудования с учетом фактического состояния, увеличивая межремонтный срок эксплуатации и предотвращая внезапные поломки [14–16].

Международные стандарты определяют требования к измерительным приборам и методике их проведения. Так, вибромониторинг и вибродиагностика центробежных насосов и компрессорных агрегатов насосного оборудования выполняется с опорой на международный [17] и отечественный стандарты [18]. В настоящее время разработано и принято большое количество стандартов, регламентирующих и обязывающих проведение вибрационной диагностики оборудования ТЭЦ [19–23]. Стандарты описывают предельный уровень вибрации по амплитуде или среднеквадратическому значению вибросмещения, виброскорости или виброускорения. Данные параметры свидетельствуют о наличии неисправностей, которые в дальнейшем могут привести к серьезной поломке оборудования.

Целью исследования является выявление основных дефектов электронасосного оборудования на основе комплексного анализа параметров вибрации, генерируемой в процессе работы агрегатов.

Материал и методы исследования

Проведено вибрационное обследование состояния диагональных насосных агрегатов с использованием методов и аппаратуры вибрационного контроля и диагностики с целью поэтапного внедрения системы обслуживания и ремонта по фактическому состоянию оборудования ТЭЦ. Анализ конструктивных особенностей НА позволяет определить характерные частоты развивающихся дефектов.

Так, дисбаланс ротора с рабочим колесом или его динамическая неуравновешенность проявляется на частоте вращения ротора (оборотной частоте) f_1 . Лопастная составляющая вибрации, возникающая при взаимодействии лопастей рабочего колеса с неоднородным водным потоком, проявляется на частоте $f_{pk} = n_l \cdot f_1$, где n_l – число лопаток рабочего колеса. В подшипниках из-за дисбаланса ротора могут возникать также автоколебания на ча-

стоте, равной половине частоты вращения или менее $f_{n1} \leq 0,5f_1$. Турбулентные пульсации в результате обтекания лопаток потоком – еще одна причина возникновения вибрации. Значительную величину вибрации вносит кавитация. Из-за схлопывания пузырьков воздуха на лопатках рабочего колеса возникают случайные вибрации, которые снижают ресурс насоса. Амплитуда данной составляющей случайной вибрации модулируется частотой вращения рабочего колеса, лопастной частотой и частотой автоколебаний.

Насосное оборудование ТЭЦ включает: асинхронный электродвигатель и вертикальный диагональный насос. Приводом насоса является асинхронный электродвигатель, пята которого воспринимает осевое усилие от реакции воды и массы ротора. В частности, асинхронный электродвигатель ВАН173/46-12У3 [5] имеет следующие характеристики: мощность $N = 1\,600$ кВт; напряжение $U = 6\,000$ В; синхронная частота вращения магнитного поля $n = 500$ об/мин. ($f_s = 8,33$ Гц); оборотная частота вращения ротора под нагрузкой 485 об/мин. ($f_1 = 8,083$ Гц); число полюсов $N_p = 12$, число полюсов на фазу $12/3 = 4$; число пар полюсов $P = 6$; число пазов на полюс и фазу – 3, общее число пазов $N_{паз} = 3 \times 3 \times 12 = 108$. Асинхронный электродвигатель, приводящий в движение насос, может генерировать электрические дефекты и выйти из строя из-за перегрузки и повышенного скольжения, короткого замыкания обмоток статора, обрыва стержней ротора или других причин, что приведет к остановке работы всего насосного агрегата.

На рис. 1. представлен асинхронный электродвигатель ВАН173/46-12У3 с отметкой точек измерения вибрации в радиальных направлениях на верхней 1X и 2Y и нижней 2X и 2Y опорах (подшипниках качения) и в осевом направлении 1O.



Рис. 1. Асинхронный электродвигатель
Fig. 1. Asynchronous electric motor

На рис. 2 представлена схема диагонального вертикального насоса 96ДВ(ДПВ)-4,5/23 с указанием точек измерения вибрации (рис. 3) [13]. Основные детали насоса: 1 – подвод; 2 – рабочее колесо; 3 – подшипник скольжения (точки измерения 4X, 4Y, 4O); 4 – выправляющий поток аппарат; 5 – вал; 6 – смотровой люк; 7 – отвод; 8 – подшипник качения (точки измерения 3X, 3Y); 9 – фонарь; 10 – жесткая фланцевая муфта (8 болтов), соединяющая валы насоса и электродвигателя. Привод поворота лопастей создает соответствующий вращающий момент, который штоком передается к лопастям рабочего колеса. Мощность насоса 1 240 кВт; диаметр напорного патрубка – 96 см; подача – 4,5 м³/сек (16 200 м³/ч); напор 23 м. Ротор вращается в двух направляющих подшипниках скольжения, смазываемых водой. Корпусные части состоят из отвода, диффузора, выправляющего аппарата, сферического проставка, камеры рабочего колеса, переходного кольца [8].

Рабочее колесо насоса имеет 8 лопаток (рис. 4), выправляющий (направляющий) аппарат насоса имеет 12 лопаток (рис. 5). Соответственно, при оборотной частоте ротора насоса $f_1 = 8,08$ Гц:

– лопастная частота рабочего колеса $f_{рк} = 8,083 \times 8$ лопаток = 64,64 Гц;

– лопастная частота направляющего аппарата $f_{на} = 8,083 \times 12$ лопаток = 96,96 Гц.

Результаты измерения вибрации насосно-оборудования в точках, указанных на рис. 1 и 3 представлены на рис. 6. Измерения производилось с использованием двухканального виброанализатора Valtech VP-3470. Способы установки датчиков вибрации (пьезоакселерометров) – магниты, которые позволяют регистрировать вибрацию до 10 кГц с возможностью быстрого монтажа (демонтажа). Для анализа вибрации и диагностики дефектов применялось программное обеспечение «Вибродефект», разработанное в лаборатории «Техническая диагностика» Иркутского государственного университета путей сообщения. Оценка уровня вибрации проводилась по действующим нормам [10, 11] для мощности НА более 400 кВт.

Приведенные в табл. нормативные значения вибрации по [16–18] соответствуют следующим верхним границам зон среднеквадратического значения (СКЗ) вибро смещения, вибро скорости и вибро ускорения: «хорошо» – для но-

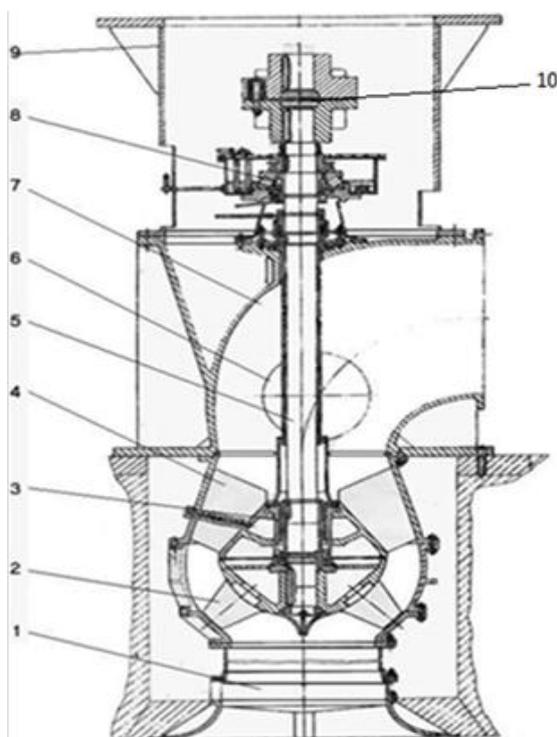


Рис. 2. Схема насоса типа ДВ в моноблочном исполнении

Fig. 2. Diagram of the DV type pump in a monoblock design

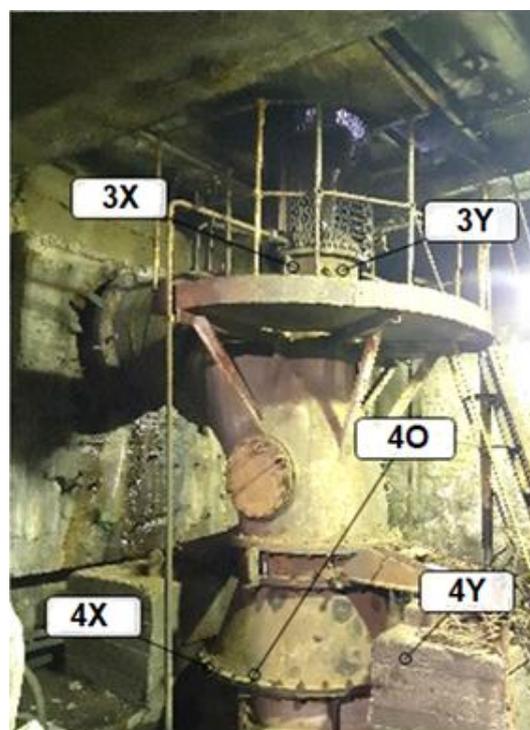


Рис. 3. Насос подачи воды марки 96ДВ(ДПВ)-4,5/23 с указанием точек измерения

Fig. 3. Water supply pump brand 96DV(DPV)-4.5/23 with indication of measurement points



Рис. 4. Рабочее колесо (8 лопаток)
Fig. 4. Impeller (8 blades)



Рис. 5. Выправляющий аппарат (12 лопаток)
Fig. 5. Straightening apparatus (12 blades)

вого оборудования; «допустимо» – для исправного оборудования без ограничения срока эксплуатации; требует принятия мер (ТПМ) – для оборудования с высокой вибрацией, которое нужно готовить к ремонту. Виброскорость нормируется в диапазоне частот вращения ротора 10–1 000 Гц (оборотов в секунду). В низкочастотной области (менее 10 Гц) нормируется виброперемещение, в высокочастотной области (более 1 000 Гц) нормируется виброускорение.

Анализ существующих норм вибрации [16–18] показал, что верхние границы допусти-

мой виброскорости по ГОСТ ИСО 10816-3-2002 [16] более «жесткие» (практически в 2 раза меньше) по сравнению с эксплуатационными нормами ГОСТ 32106-2013 [17]. По параметру виброперемещения, наоборот, более «жесткими» являются нормы [17].

Результаты измерения общего уровня СКЗ вибрации показывают, что вибрация электродвигателя имеет меньшие значения, чем у насоса. Единственная точка с относительно высокой вибрацией – осевая вибрация в районе верхнего подшипника электродвигателя (точка



Рис. 6. Результаты измерения вибрации электродвигателя ВАН173/46-12УЗ (1600 кВт) и диагонального, вертикального насоса 96ДВ(ДПВ)-4,5/23 (1240 кВт) в точках, указанных на рис. 1 и 3

Fig. 6. Results of vibration measurements of the electric motor VAN173/46-12UZ (1600 kW) and the diagonal, vertical pump 96DV(DPV)-4,5/23 (1240 kW) at points indicated in fig. 1 и 3

Границы зон вибрационного состояния насосного оборудования теплоэлектростанции
Boundaries of vibration zones of thermal power plant pumping equipment

Границы зон Zone boundaries	ГОСТ 10816-3-2002 State Standard 10816-3-2002		ГОСТ 32106 State Standard 32106		
	Среднеквадратичные значения Root Mean Square Values				
	Вибро- перемещение, мкм Vibration displacement, microns	Виброскорость, мм/с Vibration velocity, mm/s	Вибро- перемещение, мкм Vibration displace- ment, microns	Виброскорость, мм/с Vibration velocity, mm/s	Виброускорение, мм/с ² Vibration acceleration, mm/s ²
Хорошо Fine	29	2,3	18	5,4	13,5
Допустимо Acceptable	57	4,5	36	11,2	16
Требуется принятия мер Requires action	90	7,1	57	14,1	24

10), вибрация в которой находится в пределах допустимых значений. Информативна для диагностики развивающихся дефектов также радиальная вибрация в точке 1У (рис. 1 и 6). Эта вибрация генерируется развивающимися дефектами асинхронного электродвигателя, а также может передаваться через жесткую муфту (8 болтов) от насоса.

Максимальная виброскорость зафиксирована на насосе (точки 3У, 4У и 4О) 4,5–4,7 мм/сек и соответствует оценке ТПМ (требуется принятия мер) по ГОСТ 10816-3-2002 [16]. СКЗ виброускорения насоса в точках 4Х и 4О также соответствует оценке ТПМ по [17], т.е. вибрация насоса достигла уровня, когда необходимо определить вид развивающихся дефектов и принять меры к подготовке к ремонту и их устранению.

Развивающиеся дефекты электродвигателя связаны с проявлением вибрации на частотах мощности магнитного поля $2f_c = 2 \cdot 50 = 100$ Гц и их гармониках 200, 300 Гц ($f_c = 50$ Гц – частота сети), дробных гармониках частоты сети: 25, 75, 125, 150, 250 Гц; боковыми частотными составляющими f_p частоты прохода поля: $2f_c \pm f_p$, $f_p = N_p f_{s1} = 2Sf_c = 12 \times 0,25 = 3$ Гц; $N_p = 12$ – число полюсов; $f_{s1} = f_s - f_1 = 8,333 - 8,083 = 0,25$ Гц – частота скольжения, т.е. 100 ± 3; 103; 97 Гц, которые связаны с обрывом или замыканием в обмотках статора; пазовыми (зубцовыми) частотами ротора (RBPF) и их

гармониками. Число пазов данного электродвигателя $N_{\text{паз}} = 108$. $f_{\text{паз,р}} = N_{\text{паз}} \cdot f_1 = 108 \cdot 8,083 = 873$ Гц; $k f_{\text{паз,рот}} \pm 2f_c$, $k \cdot 873 \pm 100$ Гц, т.е. ($k = 1; 2; 3 \dots$); 973 Гц; 773 Гц; 1 746 Гц; 1 546 Гц.

Вибрация на электродвигателе

Максимальная вибрация электродвигателя зафиксирована в точке 10 (см. рис. 1) в осевом направлении. Пик максимальной виброскорости составил 3,29 мм/сек в точке 10 (рис. 7) осевого направления на частоте 32,3 Гц, что соответствует допустимому значению норм [16, 17]. Вибрация на этой же частоте зарегистрирована и в радиальном направлении (точки 1У и 2У). На этой же частоте расположен и пик максимального виброперемещения 17,4 мкм (точка 10). Эта частота и ее вторая гармоника 64,6 Гц соответствуют развивающемуся дефекту статорной обмотки полюсов одной из трех фаз (короткое замыкание или обрыв). Общее число полюсов в электродвигателе $N_p = 12$; число полюсов на одну фазу $N_{p1\phi} = 12 / 3 \text{ фазы} = 4$.

Характерная частота дефекта определяется произведением оборотной частоты ротора на числа полюсов на одну фазу: $f = f_1 \cdot N_{p1\phi} = 8,083 \cdot 4 = 32,32$ Гц.

На сигнале виброускорения (рис. 8) можно выделить период данной частоты с наложением высокочастотных составляющих.

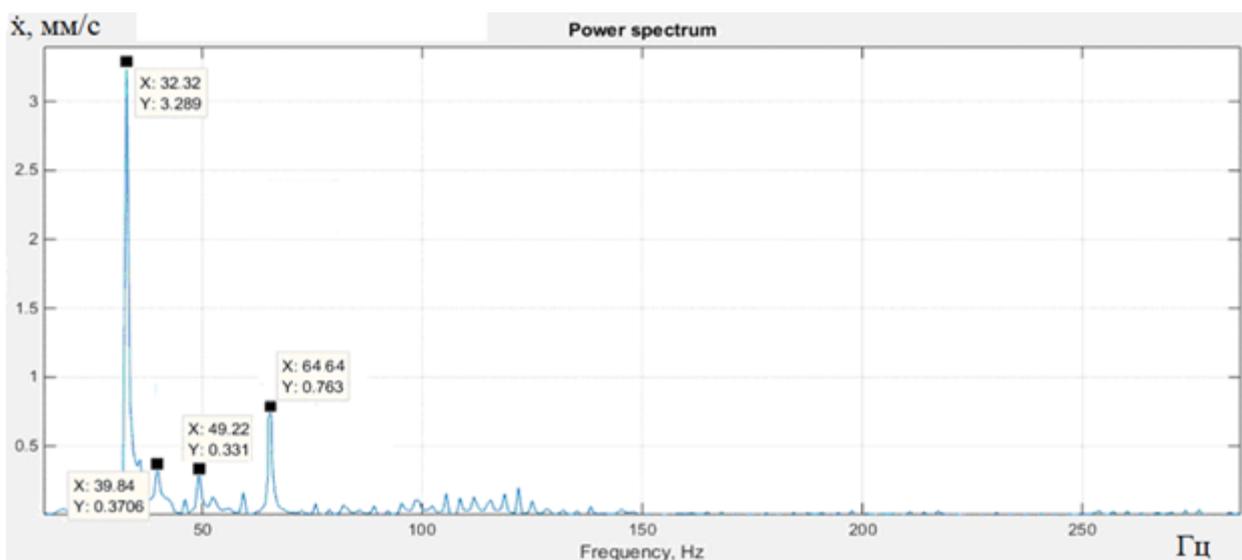


Рис. 7. Спектр виброскорости в точке 10
Fig. 7. Vibration velocity spectrum at point 10

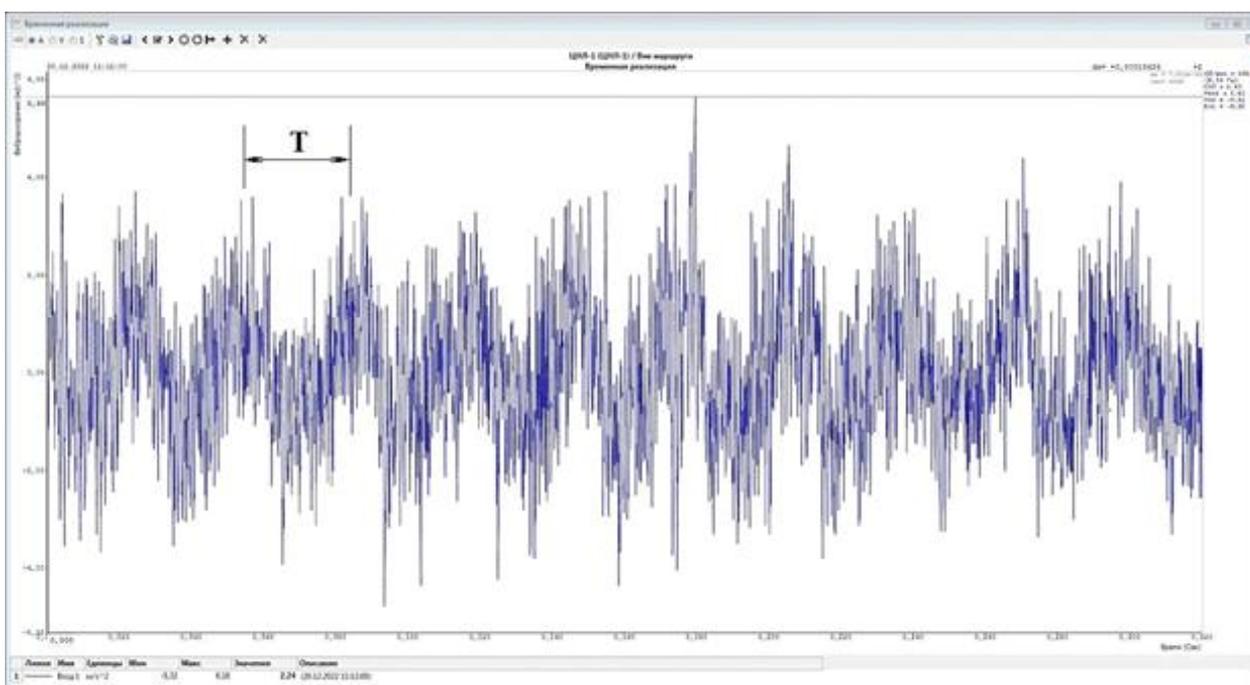


Рис. 8. Сигнал виброускорения в точке 10
Fig. 8. Vibration acceleration signal at point 10

На спектре ускорения (рис. 9), как и на спектре виброскорости, виден значительный пик на частоте 32,3 Гц.

Спектр виброускорения в точке 10 (см. рис. 9) хотя и имеет не критическое абсолютное значение СКЗ = 1,4 м/сек², но иллюстрирует присутствие в высокочастотной области нескольких характерных частот (указаны стрелками):

– пазовых (зубцовых) частот (RBPf) электродвигателя: $f_{\text{паз,р}} = N_{\text{паз}} \cdot f_1 = 108 \cdot 8,083 = 873$ Гц, где $N_{\text{паз}} = 108$ – число пазов данного электродвигателя;

– боковых полос пазовых частот $kf_{\text{паз,рот}} \pm \pm 2fc$; ($k = 1; 2; 3 \dots$); 773 Гц; 973 Гц; 1 546 Гц; 1 746 Гц; 2 519 Гц; 2 719 Гц, которые также зарегистрированы на спектрах виброускорения в

точках 1O – осевое направление (рис. 9), а также в точках 1Y, 2Y (радиальные направления);

– боковых полос прохода поля $2f_c \pm f_p$, $f_p = N_{Rfs1} = 2Sf_c = 12 \times 0,25 = 3$ Гц, т.е. $100 \pm 3; 103; 97$ Гц (рис. 9). Наличие боковой гармоники двойной частоты сети $2f_c = 100$ Гц относительно пазовой частоты электромагнитного поля (RBPF) – явный признак наличия замкнутых витков.

Пазовая (зубцовая) частота (RBPF) электродвигателя выделяется также на высокоча-

стотной части спектра виброускорения в точке 2Y (рис. 10). На этом спектре максимальный пик наблюдается на частоте 64,64 Гц, что соответствует восьмой гармонике оборотной частоты ($f_1 = 8,08$ Гц), т.е. лопастной частоте рабочего колеса насоса, которое имеет 8 лопаток (см. рис. 4). Кроме того, жесткая муфта, соединяющая ротор насоса с валом электродвигателя, также имеет 8 болтов, что может вызвать дополнительную вибрацию на этой частоте.

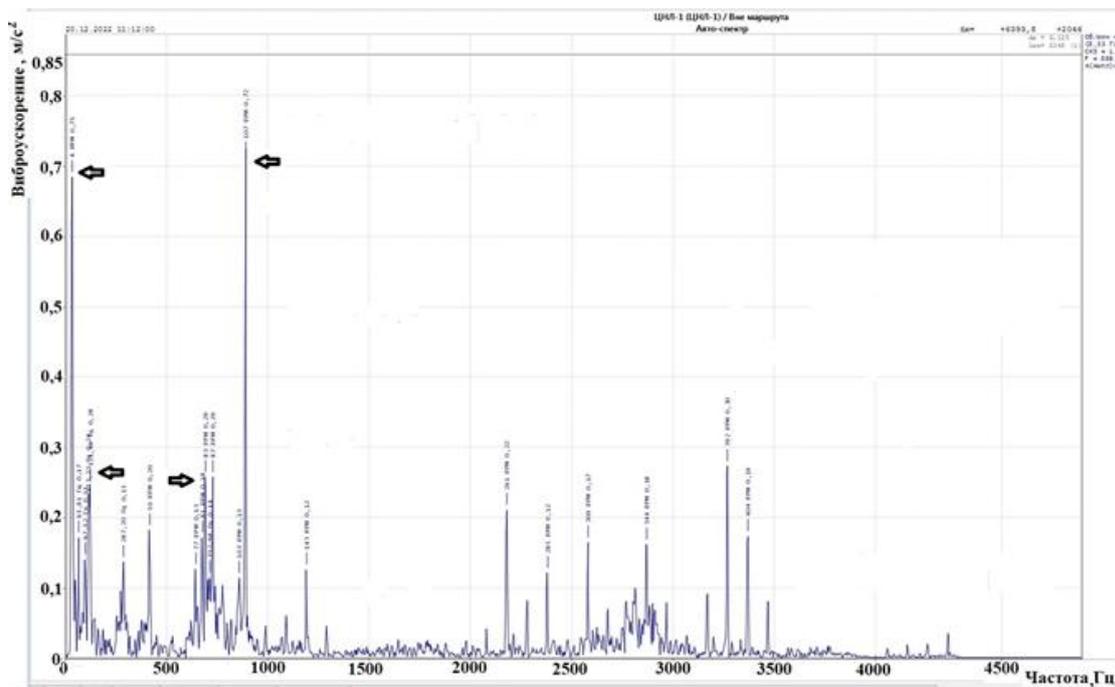


Рис. 9. Спектр виброускорения в точке 1O
Fig. 9. Vibration acceleration spectrum at point 1O

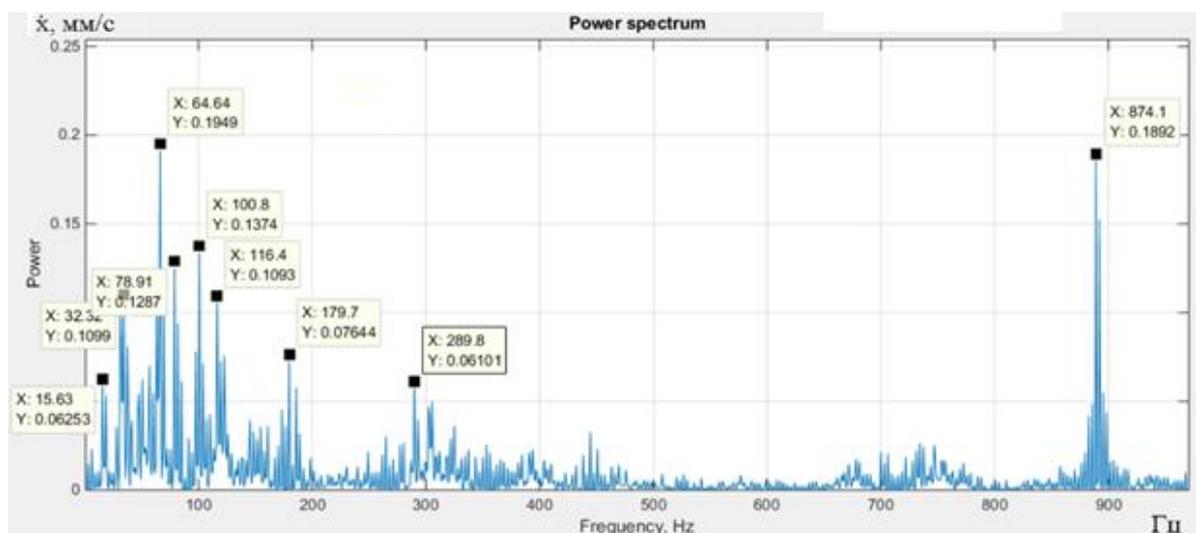


Рис. 10. Спектр виброскорости в точке 2Y
Fig. 10. Vibration velocity spectrum at point 2Y

Вибрации, генерируемые насосом

Насосы рассматриваемого в настоящей статье типа в случае развития дефектов могут генерировать вибрации [9, 11, 12] связанные со следующими процессами:

- вихреобразование;
- неоднородность потока в проточной части;
- пульсация потока жидкости на входе или выходе из насоса в осевом направлении;
- кавитация – нарушение сплошности потока в насосе вследствие резкого снижения давления в отдельных областях проточного тракта.

Вихреобразование объясняется взаимодействием рабочих элементов насоса между собой и корпусом. Наиболее интенсивное вихреобразование возникает при входе и выходе потока из рабочего колеса и направляющего аппарата.

Основная частота изменения давления на лопасти направляющего аппарата:

$$f_{\text{на}} = z_{\text{на}} \cdot f_1 = 12 \cdot 8,08 = 96,9 \text{ Гц.}$$

Лопастная частота на рабочем колесе (BPF):

$$f_{\text{рк}} = z_{\text{рк}} \cdot f_1 = 12 \cdot 8,08 = 64,6 \text{ Гц.}$$

Неоднородность потока в проточной части определяется:

– лопастной частотой (BPF = 64,6 Гц), гармониками лопастной частоты: $k \cdot f_{\text{л}}$, $k = 1, 2, 3, 4, \dots$: 129,32; 194; 258,6 Гц, а также боковыми (модуляционными) составляющими оборотной частоты относительно лопастной частоты: $f_{\text{рк}}^{\text{б}} = k \cdot f_{\text{рк}} \pm m \cdot f_1$ при $k, m = 1, 2, 3, \dots$: $1 \times 64,6 \pm \pm 1 \times 8,08 = 72,7 \text{ Гц}$; 56,6 и т.д.;

– лопастной частотой выходного направляющего аппарата и ее гармониками:

$$\begin{aligned} f_{\text{на}} &= z_{\text{рк}} \cdot z_{\text{на}} \cdot f_1; \\ &k \cdot f_{\text{на}}, \\ k &= 1, 2, 3 \dots \end{aligned}$$

Расчет проводится аналогично:

$$f_{\text{на}} = 8 \cdot 12 \cdot 8,08 = 775,6 \text{ Гц};$$

$$2 \times 775,6 = 1\,551,2 \text{ Гц и т.д.}$$

Пульсация потока жидкости на входе или выходе из насоса (осевая составляющая) проявляется на оборотной частоте $f_1 = 8,08 \text{ Гц}$, лопастной частоте рабочего колеса $f_{\text{рк}} = z_{\text{рк}} \cdot f_1 = 8,08 \times 8 = 64,6 \text{ Гц}$, лопастной частоте выходного направляющего аппарата $f_{\text{на}} = z_{\text{на}} \cdot z_{\text{н}} \cdot f_1 = 8 \cdot 12 \cdot 8,08 = 775,6 \text{ Гц}$, а также пульсацией давления за рабочим колесом при кавитационном срыве:

$$f_{\text{п}} = \frac{1}{(3 \div 6)} f_1 \approx 3 \text{ Гц.}$$

Кавитация сопровождается резким усилением высокочастотных составляющих вибрации в диапазоне 1–10 кГц. Обычно максимум широкополосной вибрации находится в зоне 500–10 000 Гц, причем по мере развития кавитационного процесса смещается в зону высоких частот.

Кавитация обычно генерирует случайную, высокочастотную широкополосную вибрационную энергию (рис. 11), на которую накладываются пики оборотной и лопастной частот и их гармоник.

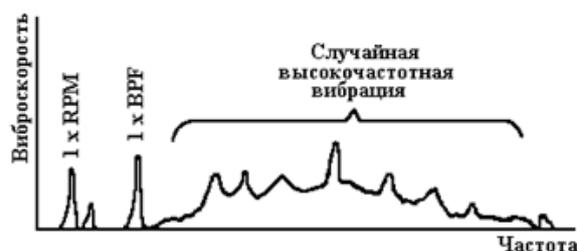


Рис. 11. Случайная высокочастотная вибрация
Fig. 11. Random high-frequency vibration

На спектре (рис. 12) в диапазоне частот 47–50 Гц виден пик боковой модуляционной составляющей оборотной частоты относительно лопастной частоты $f_{\text{рк}}$:

$$1 \cdot f_{\text{рк}} - 2 \cdot f_1 = 64,6 - 2 \cdot 8,08 = 48,4 \text{ Гц,}$$

а также присутствует пик второй гармоники лопастной частоты $2 \cdot f_{\text{рк}} = 129,2 \text{ Гц}$. Неточности расчета частот связаны с достаточно грубым шагом $1/0,3 = 3,33 \text{ Гц}$ по спектру, заданным при регистрации вибросигнала, который влияет на определение и визуализацию спектральных составляющих.

На спектрах (рис. 13 и 14) присутствует пик боковой модуляционной составляющей оборотной частоты f_1 относительно лопастной частоты $f_{\text{рк}}$:

$$1 \cdot f_{\text{рк}} + 1 \cdot f_1 = 64,6 + 1 \cdot 8,08 = 72,7 \text{ Гц};$$

$$1 \cdot f_{\text{рк}} - 2 \cdot f_1 = 64,6 - 2 \cdot 8,08 = 48,4 \text{ Гц.}$$

На рис. 15 представлен спектр ускорения в точке 4У. Присутствует широкий диапазон 1 000–4 500 Гц пиков ускорения. Интервалы между пиками составляют $2f_1$ и $8f_1 = f_{\text{рк}}$, т.е. удвоенная оборотная и лопастная частоты.

Большое число пиков боковой модуляционной составляющей оборотной частоты f_1 относительно лопастной частоты $f_{\text{рк}}$ (рис. 16):

$$1 \cdot f_{\text{рк}} - 3 \cdot f_1 = 64,6 - 3 \cdot 8,08 = 40,4 \text{ Гц};$$

$$1 \cdot f_{\text{рк}} + 2 \cdot f_1 = 64,6 + 2 \cdot 8,08 = 80,8 \text{ Гц,}$$

$$f_{\text{рк}} = 64,6 \text{ Гц.}$$

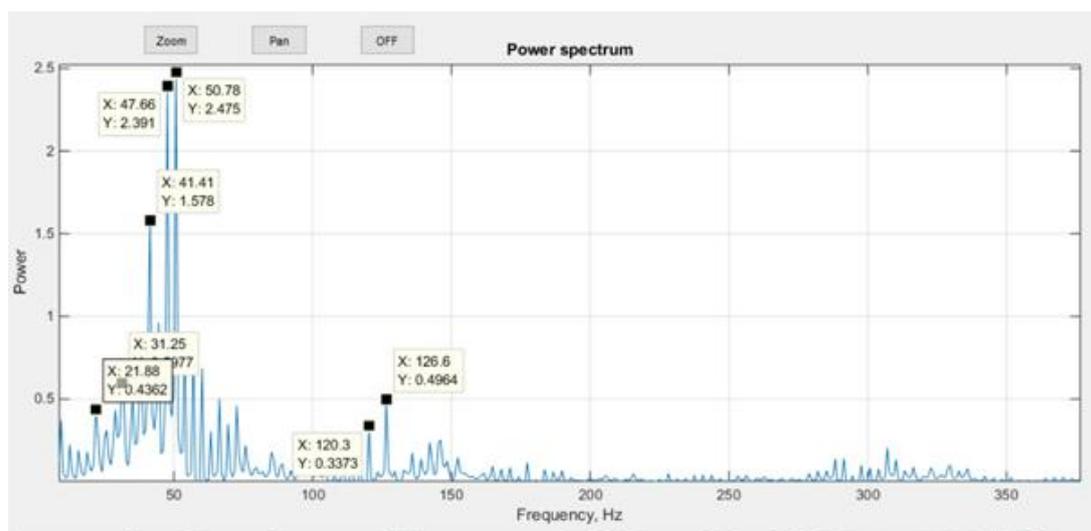


Рис. 12. Спектр виброскорости в точке 3Y насоса
 Fig. 12. Vibration velocity spectrum at point 3y of the pump

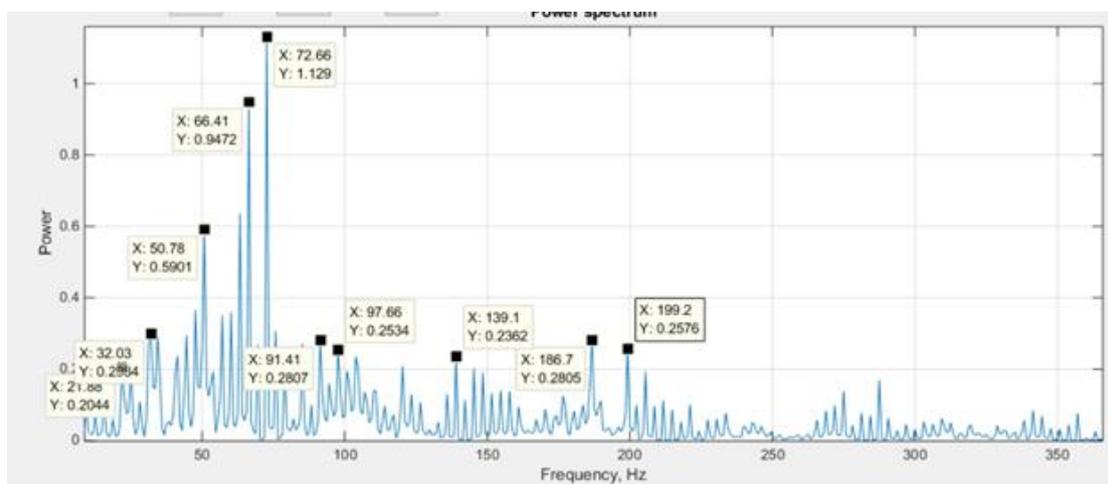


Рис. 13. Спектр виброскорости в точке 3X
 Fig. 13. Vibration velocity spectrum at point 3X

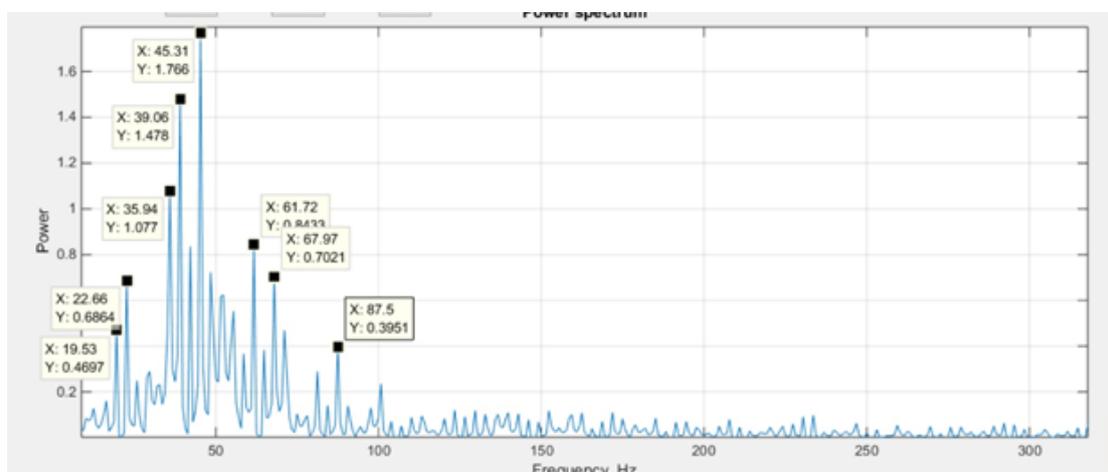


Рис. 14. Спектр виброскорости в точке 4Y
 Fig. 14. Vibration velocity spectrum at point 4Y

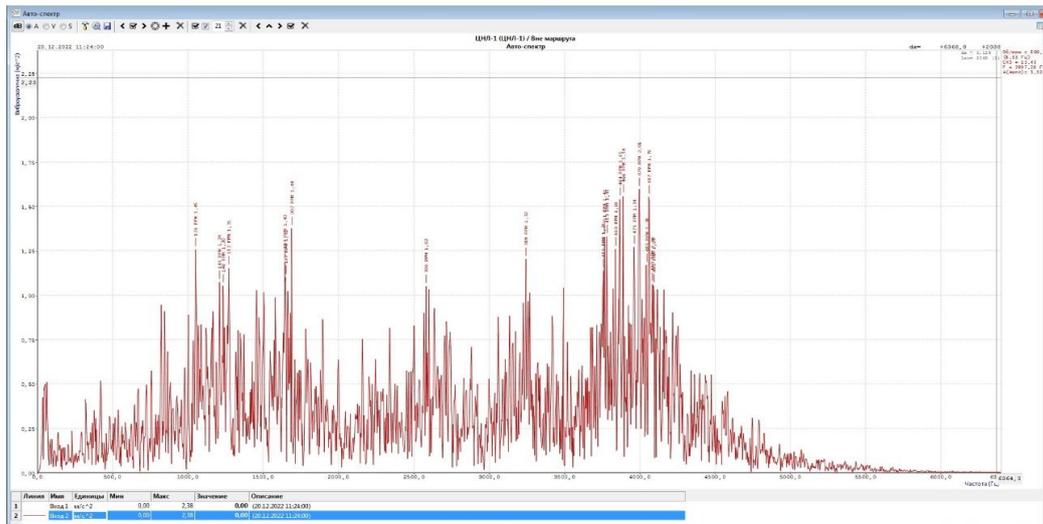


Рис. 15. Спектр ускорения в точке 4Y
 Fig. 15. Acceleration spectrum at point 4Y

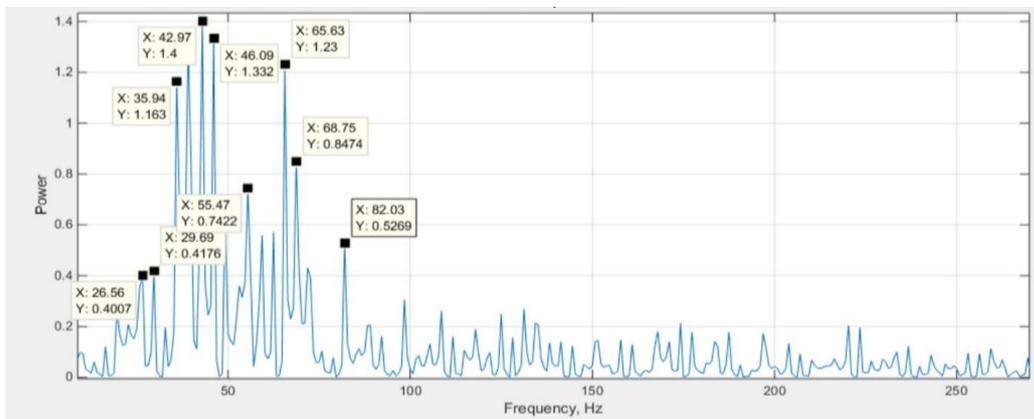


Рис. 16. Спектр скорости в точке 4O
 Fig. 16. Velocity spectrum at point 4O

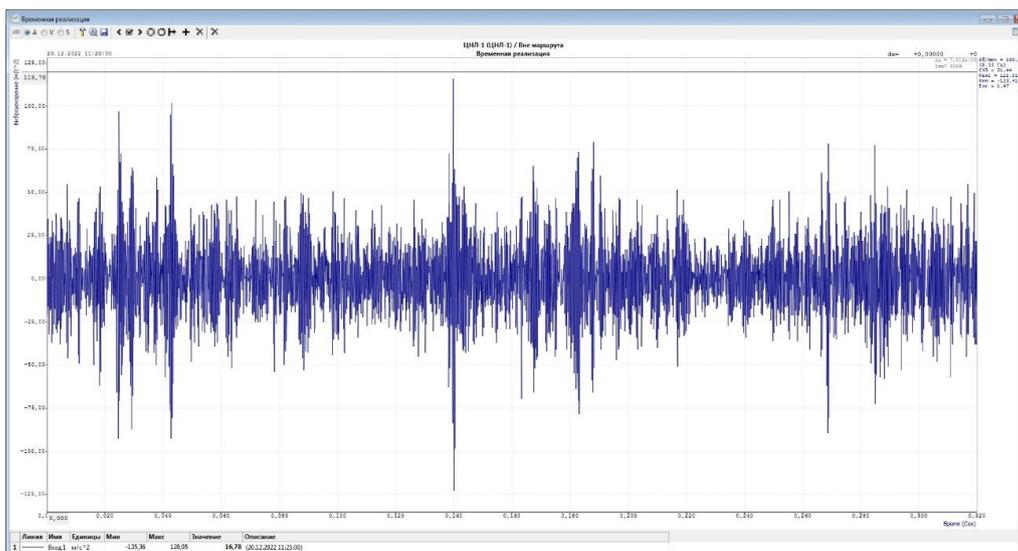


Рис. 17. Сигнал виброускорения в точке 4O (осевая составляющая)
 Fig. 17. Vibration acceleration signal at point 4O (axial component)

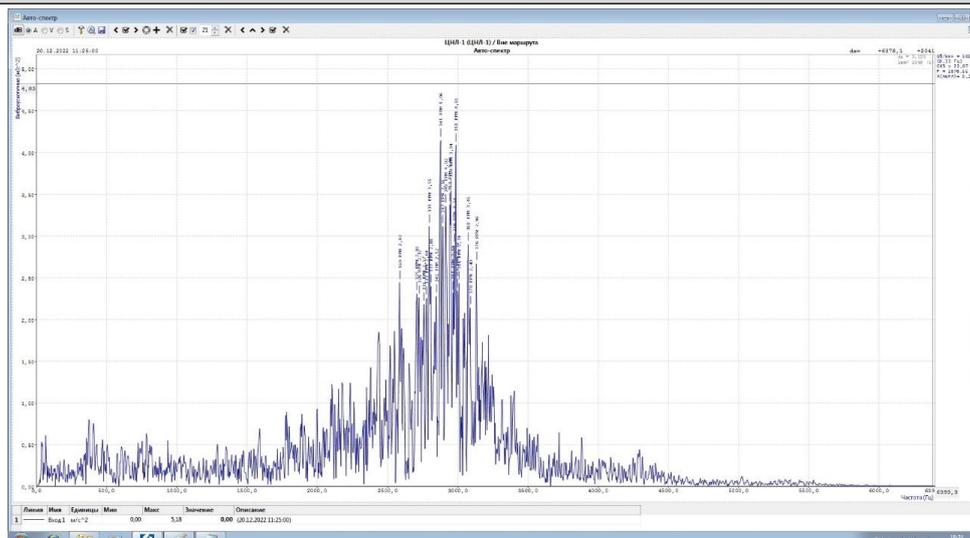


Рис. 18. Спектр ускорения в точке 10
Fig. 18. Acceleration spectrum at point 10

Сигнал показывает значительную импульсность. Пик-фактор сигнала виброускорения $PMK_f = 118/21,4 = 5,5$ (рис. 17). Максимальные пики ускорений лежат в диапазоне частот 2 325–3 100 Гц, т.е. между третьей и четвертой гармониками лопастной частоты выходного направляющего аппарата (рис. 18):

$$f_{лн} = z_{лн} \cdot z_{н} \cdot f_1 = 8 \cdot 12 \cdot 8,08 = 775,68 \text{ Гц};$$

$$k \cdot f_{лн}; k = 3; 4.$$

Интервалы между пиками ускорений $2f_1 = 2 \cdot 8,08 = 16,16$ Гц равны удвоенной оборотной частоте.

Заключение

Результаты проведенного комплексного анализа показали наличие развитых дефектов в насосе, связанных с нарушением непрерывности потока воды во внутренней проточной части насоса, а именно: вихреобразование, неоднородность и пульсация потока жидкости на входе и выходе из насоса в осевом направлении, а также, как следствие, кавитация. Эти дефекты связаны с износом проточной части, лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата. Подтверждением данных выводов служат выявленные в резуль-

тате дефектовки агрегатов насоса следы износа лопаток рабочего колеса в следствие действия кавитации. Кавитация в насосе может приводить к тяжелым последствиям, если не будет вовремя устранена. Дефект кавитации на лопатках насоса выглядит как эродированная, шероховатая поверхность с множеством мелких кратеров, расположенных в зоне низкого давления (рис. 19). Во время диагностировать и предотвратить кавитацию крайне важно для обеспечения надежной и долгой работы насосного оборудования.



Рис. 19. Износ лопаток рабочего колеса в результате кавитации
Fig. 19. Cavitation defect on the pump impeller

Список литературы

1. Шредер К. Тепловые электростанции большой мощности. Ч. 1. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1960. 575 с.
2. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. М. : Энергия, 1976. 447 с.
3. Веселова И.Н., Окулова М.В. Исследование вибраций главных паропроводов свежего пара первого энергоблока Волгодонской АЭС // Изв. высш. учеб. завед. Ядерная энергетика. 2010. № 1. С. 49–55.
4. Вибрационная диагностика оборудования ТЭЦ / А.С. Хвостиков, А.В. Космынин, В.С. Щетинин и др. // Современные наукоемкие технологии. 2012. № 9. С. 81–82.
5. Лободенко Е.И. Колебания и вибродиагностика магистральных насосных агрегатов // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 1. С. 66–67.

6. Герике П.Б., Никитин А.Г. Вибродиагностика центробежных насосов // Вестн. науч. центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2020. № 4. С. 83–89.
7. Разработка методики вибродиагностики центробежных насосных агрегатов для нефтегазового комплекса / А.А. Паранук, М.А. Меретуков, Е.И. Величко и др. // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 2. С. 78–85.
8. Неразрушающий контроль : справочник. Т. 8 / под общ. ред. В.В. Клюева. М. : Машиностроение, 2005. 789 с.
9. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. СПб. : СПбГМТУ, 2004. 152 с.
10. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. Иркутск : ИрГТУ, 1999. 228 с.
11. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
12. Герике П.Б., Блюменштейн В.Ю. Результаты вибродиагностики оборудования центробежных насосов применительно к созданию единого критерия оценки фактического состояния // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. 2016. №6 (118). С. 89–97.
13. Лукьянов А.В. Управление техническим состоянием роторных машин (система планово-диагностического ремонта). Иркутск : ИрГТУ, 2000. 229 с.
14. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Исследование динамики крепления датчиков вибрации шпинделей обрабатывающих центров // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2015. № 2(97). С. 28–35.
15. Герике Б.Л., Абрамов И.Л., Герике П.Б. Стратегия технического обслуживания горных машин по фактическому состоянию на основе методов вибродиагностики и неразрушающего контроля // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. 2008. № 1 (65). С. 11–14.
16. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15 000 мин⁻¹. Введ. 2007–11–01. М. : Стандартинформ, 2007. 14 с.
17. ГОСТ 32106-2013 Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. Введ. 2014–11–01. М. : Стандартинформ, 2019. 9 с.
18. ГОСТ Р 53564-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга. Введ. 2011–01–01. М. : Стандартинформ, 2019. 18 с.
19. ГОСТ 30576-98 Вибрация. Насосы центробежные питательные тепловых электростанций. Нормы вибрации и общие требования к проведению измерений. Введ. 2000–07–01. М. : Изд-во стандартов, 2000. 4 с.
20. ГОСТ Р ИСО 20816-2-2022 Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Ч. 2. Стационарные газовые турбины, паровые турбины и генераторы с гидравлическими подшипниками мощностью свыше 40 МВт и частотами вращения 1500, 1800, 3000 и 3600 мин⁻¹. Введ. 2022–12–01. М. : Рос. ин-т стандартизации, 2022. 26 с.
21. Schreiber R. Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis // Proceedings of the 17th International Carpathian Control Conference (ICCC). High Tatras, 2016. P. 668–672. DOI 10.1109/CarpathianCC.2016.7501179.
22. Balducci F., Arghir M., Gaudillere S. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. Dusseldorf, 2014. Volume 7B: Structures and Dynamics. DOI 10.1115/GT2014-25552.
23. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox : a review / T. Wang, Q. Han, F. Chu et al. // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 126. P. 662–685. DOI 10.1016/J.YMSSP.2019.02.051.

References

1. Shreder K. Teplovye elektrostantsii bol'shoi moshchnosti. Ch. 1 [High-power thermal power plants. Part 1]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1960. 575 p.
2. Ryzhkin V.Ya. Teplovye elektricheskie stantsii [Thermal power plants]. Moscow: Energiya Publ., 1976. 447 p.
3. Veselova I.N., Okulova M.V. Issledovanie vibratsii glavnykh paroprovodov svezhego para pervogo energobloka Volgodonskoi AES [Research of vibration of the main fresh steam pipelines of the first power unit of the Volgodonsk nuclear power plant]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Yadernaya energetika* [Bulletins of higher educational organizations. Nuclear energy], 2010, no 1, pp. 49–55.
4. Khvostikov A.S. Kosminin A.V., Shchetinin V.S. Ryabykh I.V. Vibratsionnaya diagnostika oborudovaniya TETs [Vibration diagnostics of thermal power plant equipment]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies], 2012, no 9, pp. 81–82.
5. Lobodenko E.I. Kolebaniya i vibrodagnostika magistral'nykh nasosnykh agregatov [Vibrations and vibration diagnostics of main pumping units]. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya* [International Journal of Experimental Education], 2015, no 1, pp. 66–67.
6. Gerike P.B., Nikitin A.G. Vibrodagnostika tsentrobezhnykh nasosov [Vibration diagnostics of centrifugal pumps]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti* [Bulletin of the Scientific center for safety of work in the coal industry], 2020, no 4, pp. 83–89.
7. Paranuk A.A., Meretukov M.A., Velichko E.I., Kokhuzheva R.B., Rumyantsev S.V., Subochev O.G. Razrabotka metodiki vibrodagnostiki tsentrobezhnykh nasosnykh agregatov dlya neftegazovogo kompleksa [Development of a technique for vibration diagnostics of centrifugal pumping units for the oil and gas industry]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies], 2022, no 2, pp. 78–85.
8. Nerazrushayushchii kontrol': spravochnik v 8 t. T. 8 [Non-destructive testing: handbook in 8 vol. Vol. 8/ed by Klyuev V.V.]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 789 p.
9. Barkov A.V., Barkova N.A. Vibratsionnaya diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibratsii [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis]. Saint Petersburg: SPbGMTU Publ., 2004. 152 p.

10. Luk'yanov A.V. Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin [Classifier of vibration diagnostic signs of defects in rotary machines]. Irkutsk: IrGTU Publ., 1999. 228 p.
11. Shubov I.G. Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin [Noise and vibration of electrical machines]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986. 208 p.
12. Gerike P.B., Blyumenshtein V.Yu. Rezultaty vibrodiagnostiki oborudovaniya tsentrobezhnykh nasosov primenitel'no k sozdaniyu edinogo kriteriya otsenki fakticheskogo sostoyaniya [The results of vibration diagnostics of centrifugal pump equipment in relation to the creation of a single criterion for assessing the actual condition]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2016, no 6 (118), pp. 89–97.
13. Luk'yanov A.V. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem rotornykh mashin (sistema planovo-diagnosticheskogo remonta) [Control of the technical condition of rotary machines (system of scheduled diagnostic repair)]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2000. 229 p.
14. Aleinikov D.P., Luk'yanov A.V. Issledovanie dinamiki krepleniya datchikov vibratsii shpindel'ei obrabatyvayushchikh tsevtrov [Research of the dynamics of fastening vibration sensors of spindles of machining centers]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2015, no 2, pp. 28–35.
15. Gerike B.L., Abramov I.L., Gerike P.B. Strategiya tekhnicheskogo obsluzhivaniya gornykh mashin po fakticheskomu sostoyaniyu na osnove metodov vibrodiagnostiki i nerazrushayushchego kontrolya [The strategy of maintenance of mining machines according to the actual condition based on methods of vibration diagnostics and non-destructive testing]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2008, no 1 (65), pp. 11–14.
16. GOST ISO 10816-3-2002. Vibratsiya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmerenii vibratsii na nevrashchayushchikhsya chastyakh. Ch. 3. Promyshlennyye mashiny nominal'noi moshchnost'yu bolee 15 kVt i nominal'noi skorost'yu ot 120 do 15 000 min⁻¹ [State Standard ISO 10816-3-2002. Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min when measured in situ]. Moscow: Standartinform Publ., 2007. 14 p.
17. GOST 32106-2013 Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Monitoring sostoyaniya oborudovaniya opasnykh proizvodstv. Vibratsiya tsentrobezhnykh nasosnykh i kompressornykh agregatov [State Standard 32106-2013 Condition monitoring and diagnostics of machines. Hazardous equipment monitoring. Vibration generated by rotodynamic pump and compressor units]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 9 p.
18. GOST R 53564-2009 Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Monitoring sostoyaniya oborudovaniya opasnykh proizvodstv. Trebovaniya k sistemam monitoringa [State Standard R 53564-2009 Condition monitoring and diagnostics of machines. Hazardous equipment monitoring. Requirements for monitoring systems]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 18 p.
19. GOST 30576-98 Vibratsiya. Nasosy tsentrobezhnyye pitatel'nye teplovykh elektrostantsii. Normy vibratsii i obshchie trebovaniya k provedeniyu izmerenii [Mechanical vibration. Centrifugal feed pumps for thermal stations. Evaluation of machine vibration and requirements for the measurement of vibration]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 2000. 4 p.
20. GOST R ISO 20816-2-2022 Vibratsiya. Izmereniya vibratsii i otsenka vibratsionnogo sostoyaniya mashin. Ch. 2. Statsionarnyye gazovyye turbiny, parovyye turbiny i generatory s gidravlicheskimy podshipnikami moshchnost'yu svyshe 40 MVt i chastotami vrashcheniya 1500, 1800, 3000 i 3600 min⁻¹ [State Standard R ISO 20816-2-2022 Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 2 Land-based gas turbines, steam turbines and generators in excess of 40 MW, with fluid-film bearings and rated speeds of 1500 r/min, 1800 r/min, 3000 r/min and 3600 r/min]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii Publ., 2022. 26 p.
21. Schreiber R. Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis // Proceedings of the 17th International Carpathian Control Conference (ICCC). High Tatras, 2016, pp. 668–672. DOI 10.1109/CarpathianCC.2016.7501179.
22. Balducchi F., Arghir M., Gaudillere S. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014 : Turbine Technical Conference and Exposition. Dusseldorf, 2014. Volume 7B: Structures and Dynamics. DOI 10.1115/GT2014-25552.
23. Wang T., Han Q., Chu F., Feng Z. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox : a review // Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, Vol. 126, pp. 662–685. DOI 10.1016/j.ymssp.2019.02.051.

Информация об авторах

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

Алейников Дмитрий Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: dmitriy-aleinikov@mail.ru.

Хоменко Андрей Павлович, доктор технических наук, профессор, член Высшего совета при Губернаторе Иркутской области, г. Иркутск; e-mail: Khomenko.AP@yandex.ru.

Налётов Владимир Александрович, аспирант кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: sangre96@mail.ru.

Information about the authors

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

Dmitrii P. Aleinikov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment for Mechanical Engineering Production, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: dmitriy-aleinikov@mail.ru.

Andrei P. Khomenko, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Member of the Supreme Council under the Governor of the Irkutsk Region, Irkutsk; e-mail: Khomenko.AP@yandex.ru.

Vladimir A. Naletov, Ph.D. Student of the Department of Technology and Equipment for Mechanical Engineering Production, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: sangre96@mail.ru.

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№ 4 (84)
2 0 2 4

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **Ю.А. Трофимов**
Ответственный за выпуск **Д.В. Буторин**

Подписано в печать 27.12.2024. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 28.12.2024

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,6.

Уч.-изд. л. 9,03. Тираж 500 экз. Заказ № 3753

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) 63-83-74, 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)