

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

Современные технологии Системный анализ Моделирование

2023
№ 1 (77)

Иркутский государственный
университет путей сообщения

Машиностроение • Транспортные системы • Информационные технологии

Д.т.н., профессор
Олег Валерьевич



«Повышение энергетических показателей и работоспособности электровозов и моторвагонного подвижного состава переменного тока»

МЕЛЬНИЧЕНКО

Современные технологии.
Системный анализ. Моделирование

2023 № 1(77)
No. 1(77)

Modern technologies.
System analysis. Modeling

Modern technologies System analysis Modeling

2023
No. 1 (77)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie



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

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

Подписной индекс
в каталоге «Урал-Пресс» – 64556

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

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№ 1 (77)
2 0 2 3

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

Приоритетные цели журнала

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

Стратегические задачи

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

Учредитель и издатель

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

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Телефон: +7(3952) 63-83-99, доб. 02-84

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

e-mail: stsam@irgups.ru

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

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

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

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

Modern technologies System analysis Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)

2023
No. 1 (77)

Founded in 2004

Published quarterly

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

Aims and Scope

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

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

Founder and publisher

Irkutsk State Transport University
(15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russian Federation)

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Editorial council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Address: 15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russia

Tel.: +7(3952) 63-83-99, доб. 02-84

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

e-mail: stsam@irgups.ru

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

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

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

The journal is included in the list of leading scholarly journals

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

- Mechanical engineering and mechanical science;
- Transport.

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

- Куприянов И.С., Лукьянов А.В.** Оценка технического состояния асинхронных электродвигателей с помощью аппарата нечеткой логики 10
- Маломыжев О.Л., Маломыжев Д.О., Пыхалов А.А., Лебедев И.Н.** Разработка устройства регистрации и контроля параметров при циклических испытаниях сборных конструкций 22
- Нозирзода Ш.С., Мирзахмедов Т-Б.Е.** Разработка математической модели установки автоматизированной линии по получению исходного сырья из вторичных полимерных материалов для технологии послойного наплавления 32

Транспорт

- Рогалёв А.В., Соловьёва О.С., Емельянов А.Г.** Анализ статистики срабатывания защиты фидеров контактной сети на примере Забайкальской железной дороги 42
- Матяш Ю.И., Родченко А.Д., Петракова А.Г.** Исследования возможности снижения степени износа гребня колеса в грузовом вагоне 51
- Григорьева Н.Н., Черняева Т.Н.** Применение методов анализа ассортимента в целях совершенствования закупочной деятельности в структурных подразделениях холдинга ОАО «РЖД» 60
- Асалханова Т.Н., Осколков А.А.** Повышение качества планирования и организации работ по текущему содержанию железнодорожного пути 73
- Кулинич Ю.М., Шухарев С.А., Стародубцев Д.А.** Моделирование оптимального управления асинхронным приводом 83
- Ю.И. Белоголов** Увеличение пропускной способности участка Слюдянка-1 – Улан-Удэ за счет построения оптимальной модели движения поездов 94
- Гришкова Д.Ю.** Ранжирование клиентов контейнерного терминала в целях увеличения доли переработки контейнеров по «прямому» варианту 106
- Дульский Е.Ю., Иванов П.Ю., Ромашов А.В., Трескин С.В.** Анализ проблемы износа в зоне контакта «пятник – подпятник» грузового подвижного состава и пути ее минимизации 116
- Власова Н.В., Оленевич В.А.** Цифровизация как основное стратегическое направление для достижения устойчивой конкурентной позиции ОАО «РЖД» на транспортном рынке 127
- Самойлова А.С., Мельниченко О.В.** Повышение энергоэффективности работы современного отечественного электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения 136
- Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л., Астраханцев Л.А., Тихомиров В.А., Зарубин А.Д.** Перспективное развитие теории электромагнитных, энергетических процессов и совершенствование технологии электрической тяги 144
- Чубарова И.А., Доможирова А.Д.** Моделирование процессов билетно-кассового обслуживания посетителей вокзального комплекса 156

Информационные технологии, управление и обработка

Дусакаева С.Т., Носарев М.П., Хохлов И.А., Нирян П.Л. Применение алгоритма нечеткой логики Мамдани для оценки качества моделей искусственного интеллекта на основе имеющихся данных	170
Кашковский В.В., Устинов В.В., Чобанян Л.Г. Методика и алгоритмы построения оптимальных программ диагностирования технических систем	181
Асламова В.С., Мелентьева А.А., Асламов А.А. Анализ статистики показателей дорожного травматизма за 2021 и 2022 гг. в Иркутском регионе	194

Персоналии

Д.т.н., профессор Мельниченко О.В.	207
---	-----

CONTENTS

Machine Building and Theoretical Engineering

- Kupriyanov I.S., Luk'yanov A.V.** Evaluation of the technical condition of asynchronous electric motors using fuzzy logic apparatus 10
- Malomyzhev O.L., Malomyzhev D.O., Pykhalov A.A. Lebedev I.N.** Development of a registration and parameter control device for cyclic tests of prefabricated structures 22
- Nozirzoda Sh.S., Mirzakhmedov T.-B. E.** Development of a mathematical model for the installation of an automatic line for obtaining feedstock from secondary polymeric materials for layer-by-layer deposition technologies 32

Transport

- Rogalev A.V., Solov'eva O.S., Emel'yanov A.G.** The service form effectiveness analysis of locomotives maintenance and repair 42
- Matyash Yu.I., Rodchenko A.D., Petrakova A.G.** Research of the possibility of reducing wear degree of the wheel edge in a freight wagon 51
- Grigor'eva N.N., Chernyaeva T.N.** Application of assortment analysis methods in order to improve procurement activities in the structural divisions of the holding JSC «Russian Railways» 60
- Asalkhanova T.N., Oskolkov A.A.** Improving the quality of planning and organization of work on the current railway track maintenance 73
- Kulinich Yu.M., Shukharev S.A., Starodubtsev D.A.** Simulation of optimum control of asynchronous drive 83
- Belogolov Yu.I.** Increasing the throughput capacity of the Slyudyanka-1 - Ulan-Ude section by building an optimal train traffic model 94
- Grishkova D.Yu.** Ranking of container terminal customers in order to increase the share of container processing by the «direct» version 106
- Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Romashov A.V., Treskin S.V.** Analysis of the problem of wear in the contact zone «centre plate – thrust bearing» of freight rolling stock and ways to minimize it 116
- Vlasova N.V., Olentsevich V.A.** Digitalization as the main strategic direction for achieving a stable competitive position of JSC «Russian Railways» in the transport market 127
- Samoilova A.S., Mel'nichenko O.V.** Improving the energy efficiency of a modern domestic AC electric locomotive in the regenerative braking mode 136
- Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Zarubin A.D.** Prospective development of the theory of electromagnetic, energy processes and improvement of electric traction technology 144
- Chubarova I.A., Domozhirova A.D.** Simulation of the processes of ticket and cash service for visitors of the station complex 156

Information technology, management and processing

- Dusakaeva S.T., Nosarev M.P., Khokhlov I.A., Niryan P.L.** Application of the Mamdani fuzzy logic algorithm to assess the quality of artificial intelligence models based on available data 170
- Kashkovskii V.V., Ustinov V.V., Chobanyan L.G.** Methodology and algorithms for constructing optimal diagnostic programmes for technical systems 181
- Aslamova V.S., Melent'eva A.A., Aslamov A.A.** Analysis of traffic injury statistics for 2021 and 2022 in the Irkutsk region 194

Personalities

- Doctor of Engineering Science, Full Professor O.V. Melnichenko 207

Требования к статьям, принимаемым к публикации

Рукописи статей представляются в электронном и распечатанном виде.

Рекомендуемый объем статей **9-12 стр.**

1. К статье прилагается:

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

2. Статья включает в себя:

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

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

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

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

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

При вставке формул использовать только Microsoft Equation 3 с параметрами:

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

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

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

Статьи, представляемые в журнал, проходят обязательное рецензирование.

Самоцитирование журнала в статьях **запрещено**.

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

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

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

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

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

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

**MACHINE BUILDING AND THEORETICAL
ENGINEERING**

Оценка технического состояния асинхронных электродвигателей с помощью аппарата нечеткой логики

И.С. Куприянов, А.В. Лукьянов✉

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

✉loukian@inbox.ru

Резюме

В настоящий момент в технике наблюдается тренд на усложнение конструкций, а именно оптимизацию используемых ресурсов, повышение безопасности и экологичности работы, уменьшение участия в ней человека. В связи с этим модели оценки технического состояния при планово-предупредительной системе ремонта и проводимых в рамках нее мероприятий приводят к избыточным финансовым расходам на поддержание работы оборудования. При этом не обеспечиваются достаточные гарантии исключения внезапных отказов. Поэтому актуальной задачей является разработка систем оценки технического состояния и функциональной диагностики оборудования в реальном времени. В статье произведена оценка факторов, влияющих на асинхронные электродвигатели, выполнено структурирование параметров и определение показателей, максимально отражающих их текущее состояние. Одной из характеристик, наиболее полно описывающей физический принцип работы электродвигателя, является ток в обмотках статора. Связь тока и внешнего магнитного поля позволяет изучить развивающиеся дефекты без серьезной коррекции системы оценки. Например, анализ текущего состояния тока дает возможность с достаточной точностью диагностировать «явные» неисправности асинхронных электродвигателей и определять степень их развития. Это было проверено и реализовано при исследовании данных, полученных в ходе конечно-элементного моделирования. Для развития метода прогнозирования работы асинхронных электродвигателей необходима доработка математического аппарата с возможностью дополнения метода данными анализа спектрального состава вибрации, сигнала тока и внешнего магнитного поля.

Ключевые слова

асинхронный электродвигатель, обмотки статора, нечеткая логика, дефект, ток статора, техническое состояние, диагноз

Для цитирования

Куприянов И.С. Оценка технического состояния асинхронных электродвигателей с помощью аппарата нечеткой логики / И.С. Куприянов, А.В. Лукьянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 10–21. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).10-21.

Информация о статье

поступила в редакцию: 17.02.2023; поступила после рецензирования: 17.03.2023 г.; принята к публикации: 20.03.2023 г.

Evaluation of the technical condition of asynchronous electric motors using fuzzy logic apparatus

I.S. Kupriyanov, A.V. Luk'yanov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉loukian@inbox.ru

Abstract

There is a trend in technology towards structures complication for such reasons as optimizing the resources used, improving safety, reducing human participation in operation and environmental friendliness of work. In this regard, models for assessing the technical condition, in particular, the planned preventive system and the measures carried out on their basis lead to excessive financial costs for maintaining the operation of equipment, without sufficient guarantees against sudden failures. Therefore, an urgent task is to develop systems for the real time evaluation of technical condition of equipment and its functional diagnostics. The factors affecting the state of the induction motor are evaluated, their structuring is carried out and the most important indicators reflecting the state of the machine are determined. One of the parameters most fully describing the state of the machine due to the principles of operation is the current in the stator windings. Also, the connection of the current and the external magnetic field allows to study the developing defects without a serious correction of the evaluation system. For example, the analysis of the actual state of the current makes it possible to distinguish with sufficient accuracy the «pure» malfunctions of the machine and determine the degree of their development, which was verified by analyzing the data obtained during finite element modeling. To develop the method of predicting the machine condition, a revision of the math device is necessary with the possibility of analyzing the spectral composition of a current signal or an external magnetic field.

Keywords

asynchronous electric motor, stator windings, fuzzy logic, defect, stator current, technical condition, diagnosis

For citation

Kupriyanov I.S., Luk'yanov A.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniti asinkhronnykh elektrodvigateli s pomoshch'yu apparata nechetkoi logiki [Evaluation of the technical condition of asynchronous electric motors using fuzzy logic apparatus]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 10–21. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).10-21.

Article info

Received: February 17, 2023; Revised: March 17, 2023; Accepted: March 20, 2023.

Введение

На сегодняшний день в промышленности наиболее широко применяется планово-предупредительная система обслуживания [1, 2]. Данная система технического обслуживания используется на предприятиях генерации и распределения электрической энергии, транспорта, жилищно-коммунального хозяйства, в том числе и для критически важных систем, не имеющих дублирования, внеплановый выход из строя которых приводит к большим потерям. Цель подобной системы заключается в планировании выведения оборудования из эксплуатации и проведения его технического обслуживания ранее момента отказа, определяемого статистической вероятностью.

При этом сложность конструкции современного машинного оборудования из-за большого разнообразия используемых узлов, а также переменного характера эксплуатационных нагрузок [2] возрастает. Поэтому в реальных условиях эксплуатации сильная функциональная и линейная связь между временем наработки и сроком эксплуатации возможна только в случае механического износа и разрушения деталей и узлов оборудования. Это приводит к тому, что практически невозможно с приемлемой точностью прогнозировать срок, в течение которого оборудование способно работать без технических отказов.

Даже типовое и широко распространенное оборудование, как, например, асинхронные электродвигатели (АЭД) одной и той же модели, но установленные в разных подсистемах одного и того же комплекса (например, электровоза), подвергающиеся стохастическому характеру воздействий таких факторов, как температура окружающей среды, продолжительность работы, характер нагрузки, качество обслуживания и ремонта, имеют различное фактическое состояние [1]. Отсюда можно сделать вывод, что система планово-предупредительного ремонта не способна полностью предотвратить отказы оборудования,

так как увеличивает издержки за счет вывода из эксплуатации бездефектного оборудования.

Следовательно, для предотвращения потерь необходимо разработать методическую базу обслуживания и ремонта по фактическому состоянию оборудования [1].

В настоящее время АЭД, являющиеся основной частью электроприводных агрегатов, диагностируются двумя способами: токовым (рассматриваются в основном амплитуды токов) и вибрационным (рассматриваются в основном амплитудные и спектральные характеристики). Однако текущий анализ данных контроля не всегда дает возможность выявить неисправности на начальной стадии их появления, при этом затруднено определение степени развития дефектов. В результате, невозможно прогнозировать изменение технического состояния агрегатов во времени. Поэтому разработка комплексного критерия оценки технического состояния оборудования, в частности АЭД, является важной задачей.

В данной статье в основном рассматривается возможность анализа тока в обмотках статора для проведения комплексной диагностики с использованием математического аппарата нечеткой логики для комплексной оценки состояния асинхронного двигателя, также имеется возможность использования других параметров состояния АЭД.

Диагнозы состояний асинхронного электродвигателя в системе функциональной диагностики

Степень повреждения АЭД будет удобно оценивать, используя следующую классификацию для оценки надежности технических систем:

D_1 – исправное состояние, машина полностью работоспособна и может эксплуатироваться без ограничений;

D_2 – поврежденное состояние, в машине развивается дефект, необходимо изменить режим эксплуатации, снизив нагрузку и/или включить ее в план ближайшего ремонта или замены;

D_3 – аварийное состояние, требуется немедленный вывод из эксплуатации в связи с приближением критических повреждений.

Три приведенных класса будут использованы как основные типы диагнозов, которые подлежат распознаванию. Определим входные (анализируемые) параметры, получаемые при диагностике состояния АЭД: x_1 – x_{20} (табл. 1) [2, 3].

Введем классы входных переменных, сгруппировав параметры состояния АЭД по видам измерений и испытаний:

Q_1 – электрические и магнитные методы контроля (x_1 – x_9);

Q_2 – визуально-механические методы контроля (x_{10} – x_{12} , x_{16} , x_{20});

Q_3 – вибрационный контроль (x_{13} – x_{15});

Q_4 – тепловизионный контроль (x_{17} – x_{19}).

Структурная схема анализа входных параметров относительно метода контроля технического состояния в рамках использования аппарата нечеткой логики приведена на рис. 1.

Распределим входные переменные на классы:

Таблица 1. Параметры состояния асинхронного электродвигателя, получаемые при диагностике
Table 1. Parameters of the asynchronous motor state obtained during diagnostics

x_i	Названия параметров состояния State parameter names
$x_{1.1}$	Ток фазы А статора Phase A current of stator
$x_{1.2}$	Ток фазы В статора Phase B current of stator
$x_{1.3}$	Ток фазы С статора Phase C current of stator
x_2	Значение напряженности внешнего магнитного поля The value of the strength of the external magnetic field strength
x_3	Распределение напряженности внешнего магнитного поля Distribution of the external magnetic field strength
x_4	Сопротивление обмоток статора по постоянному току DC stator winding resistance
x_5	Состояние изоляции обмоток статора Stator winding insulation condition
x_6	Потери мощности холостого хода Idle power loss
x_7	Сопротивления изоляции вводов Input insulation resistance
x_8	Пробивное напряжение изоляции обмоток Breakdown voltage of winding insulation
x_9	Состояние стержней ротора (по параметрам внешнего магнитного поля) The state of the rotor bars (according to the parameters of the external magnetic field)
x_{10}	Степень износа подшипников Bearing wear
x_{11}	Эксцентриситет ротора Rotor eccentricity
x_{12}	Коэффициент пресовки обмоток Winding pressing factor
x_{13}	Радиальная составляющая вибрации Radial vibration component
x_{14}	Тангенциальная составляющая вибрации Tangential component of vibration
x_{15}	Колебания угловой скорости вращения ротора Oscillations of the angular velocity of rotation of the rotor
x_{16}	Скорость вращения ротора (скольжение) Rotor speed (slip)
x_{17}	Температура корпуса Case temperature
x_{18}	Температура обмоток Windings temperature
x_{19}	Температура контактов Contact temperature
x_{20}	Момент на валу Shaft torque

X_1 – состояние обмоток;
 X_2 – состояние магнитопровода;
 X_3 – состояние ротора;
 X_4 – состояние контактов и соединителей;
 X_5 – состояние подшипников и корпуса.

Для оценки параметров будем применять лингвистические переменные x_1 – x_{20} . Для оценки x_1 – x_7 и x_{17} – x_{19} используем единую шкалу: Н – низкий, С – средний, В – высокий. Для x_8 примем Р – равномерный, НР – неравномерный. Исключением будут являться параметры x_9 – x_{16} и x_{20} : Д – допустимое, НД – недопустимое. Каждый из терминов представляет собой нечеткое множество, заданное функцией принадлежности. Для итоговой оценки приведенных классов входных переменных используем разработанное множество терминов состояния:

A_{11} – нормальное состояние магнитопро-

вода;

A_{12} – перегревы в магнитопроводе (80–90°C);

A_{13} – перегревы в магнитопроводе (90–100°C);

A_{14} – перегревы в магнитопроводе (выше 100°C);

A_{21} – нормальное состояние обмотки;

A_{22} – межвитковые замыкания обмоток;

A_{23} – изменения сопротивления обмоток;

A_{24} – деформация обмоток;

A_{25} – ослабление прессовки обмоток;

A_{31} – исправные соединения контактной коробки;

A_{32} – перегрев соединений контактной коробки;

A_{41} – изменения формы сигнала тока в одной или нескольких фазах;

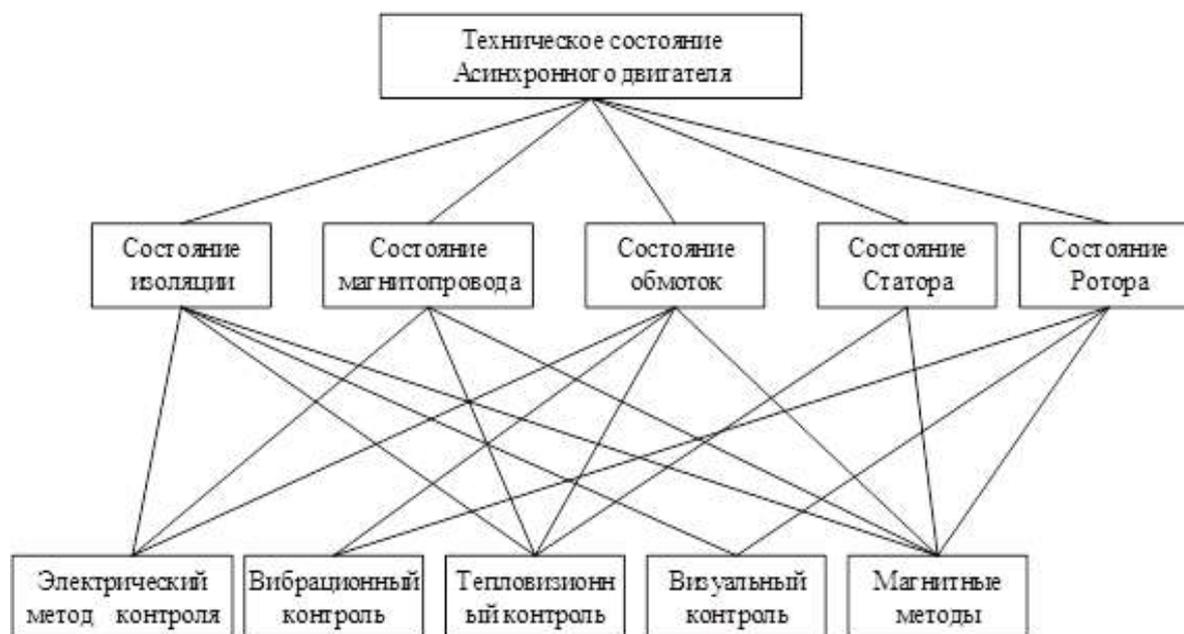


Рис. 1. Структура нечеткого логического вывода о состоянии асинхронного электродвигателя

Fig. 1. The structure of the fuzzy logical inference about the state of the induction motor

Таблица 2. Пример матрицы знаний для некоторых состояний асинхронного электродвигателя

Table 2. An example of a knowledge matrix for some states of induction motor

Параметры состояния Status Parameters								Состояние Status
$x_{1.1}$	$x_{1.2}$	$x_{1.3}$	x_2	x_3	x_4	x_{15}	x_{16}	
С	С	С	С	НР	С	Н	В	A_0
С	В	Н	В	НР	С	С	В	A_{46}
В	В	Н	В	НР	С	В	В	A_{46}
В	С	С	В	НР	Н	С	В	A_{26}
В	В	В	В	НР	Н	В	В	A_{26}
В	В	В	В	Р	С	В	В	A_{62}
В	В	В	В	Р	С	Н	В	A_{63}

A_{42} – асимметрия питающих токов;
 A_{51} – нормальная напряженность магнитного поля;
 A_{61} – превышение допустимой нагрузки на валу;
 A_{62} – обрыв одного или нескольких стержней беличьей клетки ротора;
 A_{63} – перегрев ротора;
 A_{64} – статический эксцентриситет;
 A_{65} – динамический эксцентриситет;
 A_{71} – нормальное состояние изоляции;
 A_{72} – естественное старение изоляции;
 A_{73} – ускоренное старение изоляции (электрический пробой);
 A_{74} – ускоренное старение изоляции (тепловой пробой) [4].

Рассмотрим пример матрицы знаний для состояний обмоток статора с использованием электрических методов, что обусловлено отсутствием необходимости внесения изменений в конструкцию и простотой реализации измерений (табл. 2).

Наиболее перспективным с точки зрения точности постановки диагноза представляется анализ параметров, не требующих внесения изменений в конструкцию двигателя или вносящих незначительные изменения во внешние цепи питания. Такими параметрами являются: внешнее магнитное поле АЭД, механические колебания и значения токов в обмотках статора, колебание скорости вращения ротора [5–7].

Текущее значение тока статора дает информацию о неисправности двигателя. Ток статора формирует магнитное поле АЭД и приводит в движение ротор. Поэтому ток статора, наряду с магнитным полем АЭД, линейно зависит от функционального состояния машины [8–13].

Способы анализа текущих значений тока статора

Нечеткая система полагается на набор правил. В настоящем исследовании фазные токи двигателя были проанализированы на основе последующей тенденции их изменения и по значениям тока была сделана оценка технического состояния двигателя.

Нечеткие правила и функции принадлежности сформированы посредством анализа набора данных. Для измерений, связанных с токами статора, функции принадлежности будут сгенерированы для входной переменной – ток каждой фазы статора (ОВ – отрицательно высокий, Н – нулевой, ПВ – положительно высокий)

вычисляющийся как $(I_{\text{тек}} + I_{\text{ном}}) / 2I_{\text{ном}}$ (рис. 2). Выходное состояние двигателя: исправное, поврежденное, авария (рис. 3).

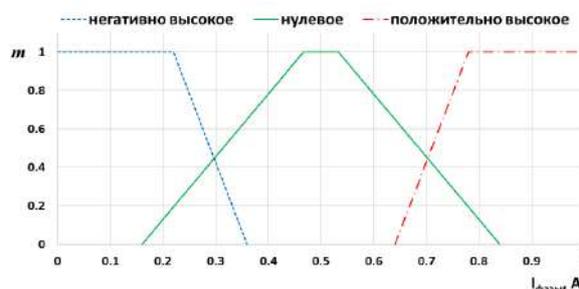


Рис. 2. Универсальная функция принадлежности фазных токов статора

Fig. 2. Universal accessory function for stator winding currents

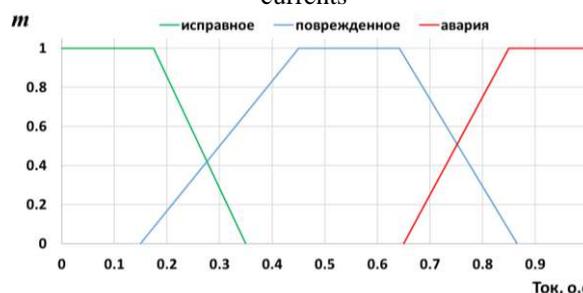


Рис. 3. Выходная функция принадлежности

Fig. 3. The final function of the accessory

На этой основе определим набор правил:

If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)
 then (OUT is исправное),

If (A is HB) and (C is HB) and (B is H)
 then (OUT is исправное),

If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)
 then (OUT is исправное),

If (A is HB) and (C is H) and (B is HB)
 then (OUT is исправное),

If (A is HB) and (C is H) and (B is H)
 then (OUT is авария),

If (A is HB) and (C is H) and (B is HB)
 then (OUT is авария),

If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)
 then (OUT is исправное),

If (A is HB) and (C is HB) and (B is H)
 then (OUT is авария),

If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)
 then (OUT is поврежденное),

If (A is H) and (C is HB) and (B is HB)
 then (OUT is Normal),

If (A is H) and (C is HB) and (B is H)
 then (OUT is авария),

If (A is H) and (C is HB) and (B is HB)

then(OUT is авария),
 If (A is H) and (C is H) and (B is HB)
 then(OUT is авария),
 If (A is H) and (C is H) and (B is H)
 then(OUT is авария),
 If (A is H) and (C is H) and (B is HB)
 then(OUT is авария),
 If (A is H) and (C is HB) and (B is HB)
 then(OUT is авария),
 If (A is H) and (C is HB) and (B is H)
 then(OUT is авария),
 If (A is H) and (C is HB) and (B is HB)
 then(OUT is поврежденное),
 If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)
 then(OUT is Normal),
 If (A is HB) and (C is HB) and (B is H)
 then(OUT is авария),
 If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)
 then(OUT is поврежденное),
 If (A is HB) and (Y is H) and (B is HB)
 then(OUT is авария),
 If (A is HB) and (C is H) and (B is H)
 then(OUT is авария),
 If (A is HB) and (C is H) and (B is HB)
 then(OUT is поврежденное),
 If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)
 then(OUT is поврежденное),
 If (A is HB) and (C is HB) and (B is H)
 then(OUT is поврежденное),
 If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)
 then(OUT is поврежденное).

Для входной и выходной функции принадлежности, которая в первом случае исполь-

зуется для каждого входного тока статора, а во втором – для АЭД в целом, выберем диапазон от 0 до 1.

Для перехода выходного значения из лингвистического вида в абсолютный применяем метод центра тяжести, имеющий наибольшее распространение при решении практических задач [14–16]. Данный метод использует в качестве значения выходной переменной координату (по оси абсцисс) центра тяжести площади результирующего терм-множества выходной лингвистической переменной, вычисляемой по формуле [4, 6]:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^k i_x d\mu_x(i)}{\sum_{i=1}^k \mu_x(i)}.$$

Для разработанных правил и выбранных диапазонов входных и выходных функций принадлежности применим веса состояний, приведенных в табл. 3.

Рассмотрим реакцию системы, разработанной на базе аппарата нечеткой логики, на различные входные данные состояния. В качестве входных данных использовались сведения, полученные при конечно-элементном моделировании электродвигателя АИР63В4 [17, 18], работающего с номинальной нагрузкой на валу. Экраны состояний, полученные в среде MatLab [19] для различных режимов работы, приведены на рис. 4–7.

Таблица 3. Состояния асинхронного электродвигателя в зависимости от значения нечеткого множества
Table 3. Motor states depending on the value of the fuzzy set

Состояние асинхронного электродвигателя Motor states	Диапазон значений Range of values
Хорошее состояние Good condition	0,53–0,6
Несимметрии тока в одной фазе (или обрыв) Current asymmetry in one phase (or open surcuit)	0,15–0,25
Дефекты ротора (обрыв стержней на стрижни) Rotor defects (breakage of rods)	0,05–0,135
Несимметрия напряжения в фазах или короткое замыкание в обмотке статора Voltage asymmetry in the phases or short circuit in the stator winding	0,25–0,5
Перенапряжение, перегрузка, малые межвитковые замыкания Overvoltage, overload, small turn-to-turn faults	0,6–0,8
Межвитковое замыкание в обмотке статора Interturn short circuit in the stator winding	Более 0,8 More than 0,8
Неизвестно Unknown	Менее 0,05 less than 0,05

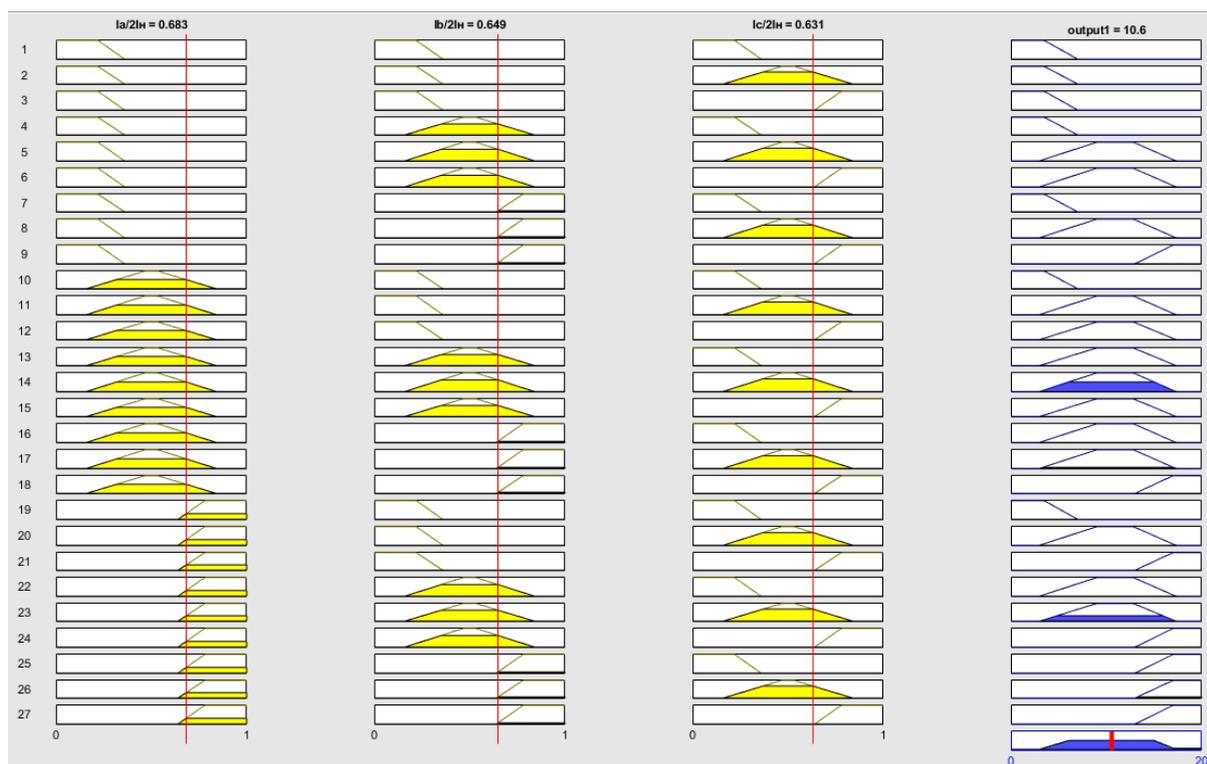


Рис. 4. Экран состояния бездефектного асинхронного электродвигателя

Fig. 4. Defect-free status screen induction motor

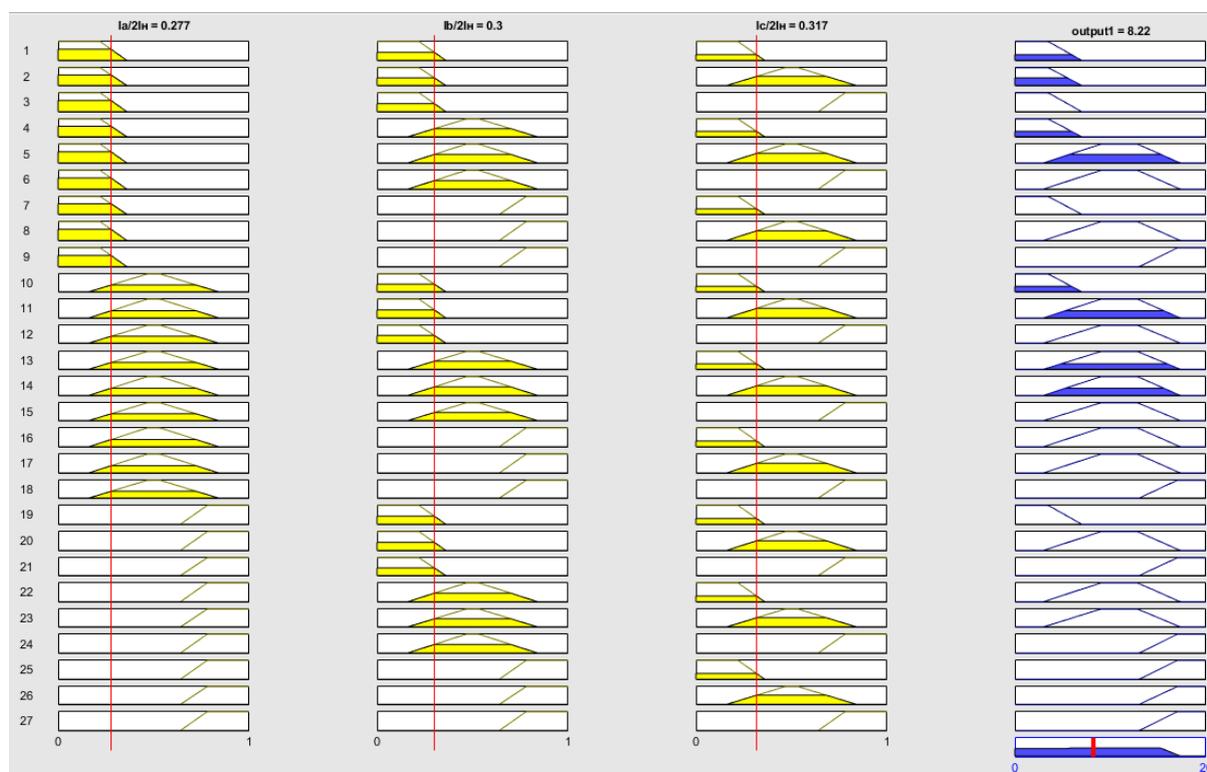


Рис. 5. Экран состояния асинхронного электродвигателя при несимметрии напряжения в фазах или коротком замыкании в обмотке фазы статора

Fig. 5. The induction motor status screen with voltage asymmetry in phases or short circuit in the stator winding

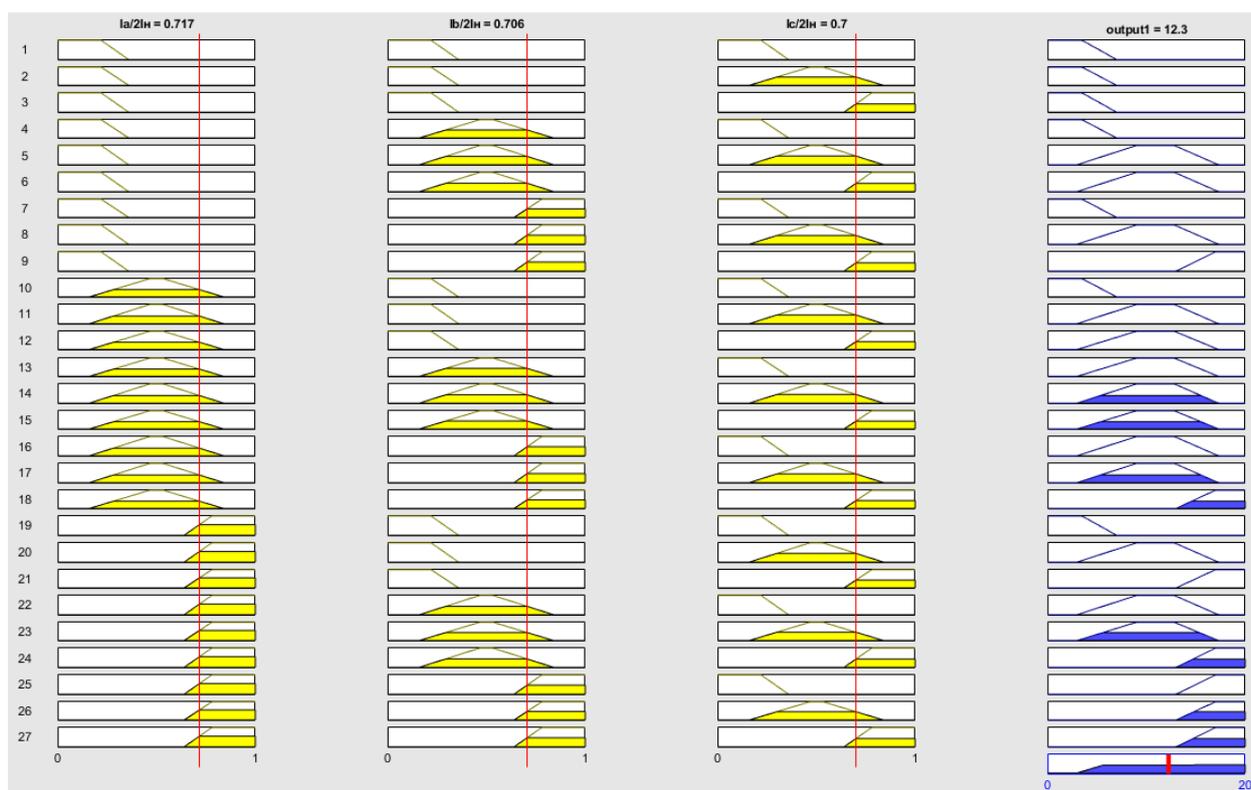


Рис. 6. Экран состояния асинхронного электродвигателя при перенапряжении и перегрузке
Fig. 6. The induction motor status screen in case of overvoltage and overload



Рис. 7. Экран состояния асинхронного электродвигателя при коротком замыкании в обмотке статора
Fig. 7. The status screen of the induction motor in case of an inter-turn short circuit in the stator winding

Возможность анализа частотного состава

Таким образом, модель, основанная на анализе текущих значений тока в фазах статора, имеет недостаток, который можно назвать перекрытием диагнозов, т.е. имеются некоторые значения выходной функции принадлежности, которые могут интерпретироваться как разные дефекты.

Как один из способов повышения точности постановки диагноза можно использовать дополнительный метод контроля с высокой степенью дифференциации по видам дефектов. В частности, анализ механических колебаний дает жесткую связь между током статора и магнитным полем АЭД [20].

Связь между током в статоре, внешним магнитным полем и вибрацией машины можно описать выражениями радиальных и тангенциальных колебаний:

$$p_r = \frac{1}{2\mu_0} \cdot b^2(\vartheta, t),$$

$$p_\tau = a(\vartheta, t) \cdot b(\vartheta, t),$$

где $b(\vartheta, t) = f(\vartheta, t)\Lambda(\vartheta, t)$ – магнитная индукция в воздушном зазоре в точке с угловой координатой ϑ в момент времени t ($f(\vartheta, t)$; $\Lambda(\vartheta, t)$ – мгновенные значения результирующей МДС обмоток статора и ротора и магнитной проводимости зазора); t – текущие время; ϑ – угловая координата [20].

В случае анализа разнообразного частотного состава гармоник вибрации поврежденного или неисправного АЭД в качестве входных переменных будем рассматривать:

- наличие частот, связанных с особенностями конструкции машины, а именно модуляции гармоник пазовых частот статора и ротора электромагнитной частотой $2f_c = 100$ Гц;
- гармоники оборотной частоты;
- вклад каждого семейства указанных частот в общий уровень вибрации.

Для измерений, связанных с частотным составом, функции принадлежности будут введены для двух входных переменных: вклад каждого семейства частот в общий уровень вибрации (Q_{PAZ} – пазовые частоты, Q_{SLIP} – оборотные частоты).

– вклад каждого семейства частот в общий уровень вибрации (Q_{PAZ} – пазовые частоты, Q_{SLIP} – оборотные частоты).

Дополнительно используется результат работы системы при анализе действующих зна-

чений тока в фазах статора или внешнего магнитного поля в трех точках, сдвинутых на межполюсное деление (Q_{CURR}).

Для упрощения вычислений будем рассматривать гармоники, имеющие амплитуду не менее 20 % от амплитуды гармоники электромагнитной частоты АЭД $2f_c = 100$ Гц.

В качестве корректирующего коэффициента k , повышающего значение входной переменной, примем количество гармоник семейства пазовых и оборотных частот.

Тогда основным выражением для вычисления входной переменной будет:

$$\frac{P_{f(x)}}{P_{sym}} \cdot k,$$

где $p_{f(x)}$ – сумма амплитуд гармоник выбранного семейства k ; p_{sym} – общий уровень вибрации машины.

Входное состояние для каждого семейства частот будет описываться как Н – низкое и В – высокое (рис. 8).

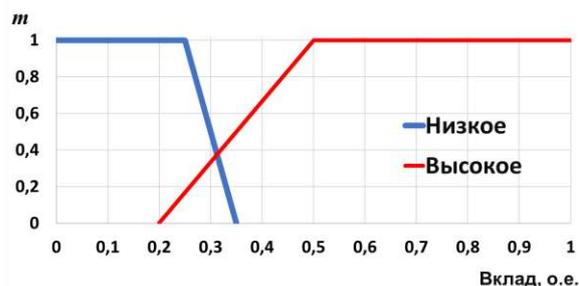


Рис. 8. Универсальная функция принадлежности для семейств гармоник
Fig. 8. Universal membership function for harmonic families (Q)

Выходную функцию оставим неизменной. Для составления системы правил воспользуемся известными справочными данными [21]. Ниже представлен набор правил для случаев эксцентриситета и межвиткового замыкания:

If and (Q_{CURR} is исправное) and (Q_{PAZ} is Н) and (Q_{SLIP} is Н) and then (OUT is исправное),

If (Q_{CURR} is поврежденное) and (Q_{PAZ} is Н) and (Q_{SLIP} is Н) then (OUT is исправное),

If Q_{CURR} is поврежденное) and (Q_{PAZ} is В) and (Q_{SLIP} is Н) then (OUT is поврежденное),

If (Q_{CURR} is поврежденное) and (Q_{PAZ} is В) and (Q_{SLIP} is Н) then (OUT is поврежденное),

If (Q_{CURR} is авария) and (Q_{PAZ} is В) and

$(Q_{SLIP} \text{ is B})$ then $(OUT \text{ is авария})$,
 If $(Q_{CURR} \text{ is авария})$ and $(Q_{PAZ} \text{ is B})$ and
 $(Q_{SLIP} \text{ is H})$ then $(OUT \text{ is исправное})$,
 If $(Q_{CURR} \text{ is авария})$ and $(Q_{PAZ} \text{ is H})$ and
 $(Q_{SLIP} \text{ is B})$ and then $(OUT \text{ is исправное})$,
 If $(Q_{CURR} \text{ is авария})$ and $(Q_{PAZ} \text{ is H})$ and
 $(Q_{SLIP} \text{ is H})$ then $(OUT \text{ is авария})$,
 If $(Q_{CURR} \text{ is авария})$ and $(Q_{SLIP} \text{ is H})$ then
 $(OUT \text{ is авария})$,
 If $(Q_{CURR} \text{ is авария})$ and $(Q_{PAZ} \text{ is H})$ then
 $(OUT \text{ is авария})$.

Для проверки реакции системы воспользуемся данными, полученными с конечно-элементной модели для токов фаз статора. Для вибрации воспользуемся сведениями, полученными в ходе эксперимента по измерению горизонтальной составляющей вибрации.

Экраны состояния для режима работы при наличии эксцентриситета ротора и межвитковом замыкании приведены на рис. 9 и 10.

Таким образом, добавление дополнительных входных переменных, связанных с анализом частотного состава механических колебаний, изменяет результирующее показание системы. Это позволяет улучшить дифференциацию диагнозов, получаемых системой.

В данном случае в диапазоне значений от 0,8 до 1 дополнительным делением интервала на два отрезка – 0,75–0,825 (эксцентриситет ротора) и 0,825–1 (межвитковое замыкание) – дифференцировать механические и электрические дефекты.

Заключение

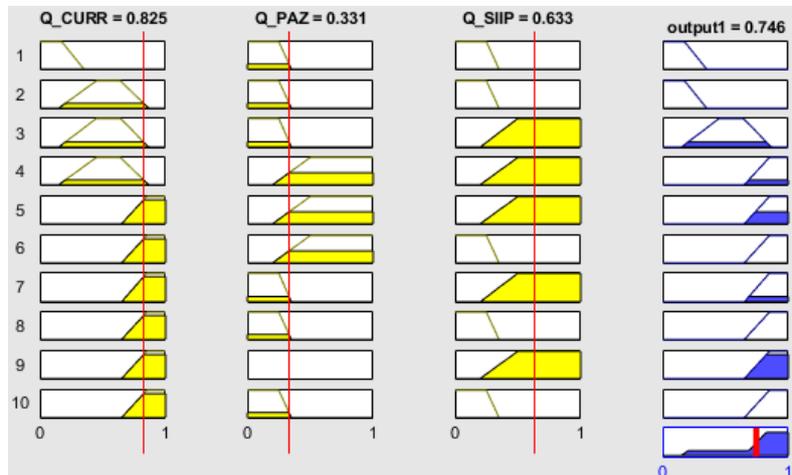


Рис. 9. Экран состояния асинхронного электродвигателя при эксцентриситете ротора
Fig. 9. The status screen of the induction motor under the rotor eccentricity

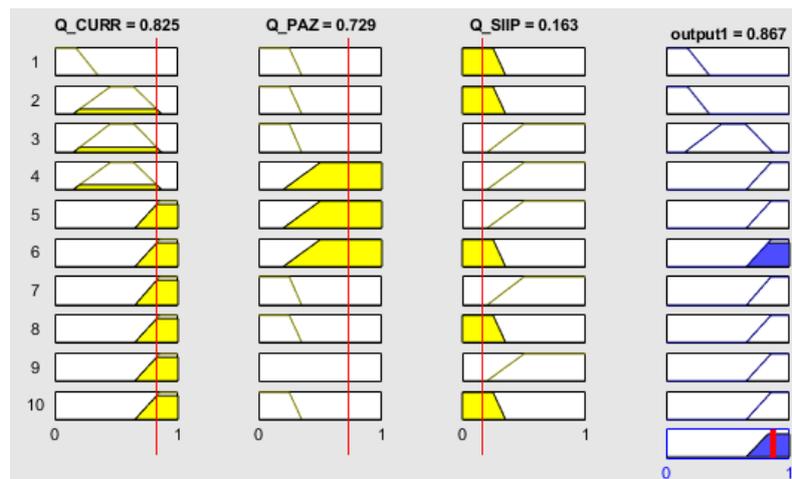


Рис. 10. Экран состояния асинхронного электродвигателя при межвитковом замыкании в обмотке статора при добавлении в систему анализа частотного состава вибрации
Fig. 10. The status screen of the induction motor in case of an inter-turn short circuit in the stator winding when the frequency composition of vibration is added to the analysis system

Методология диагностики АЭД по фактическому состоянию может быть разработана на основе анализа таких параметров, как механические колебания, величина тока в обмотках статора и внешнее магнитное поле, что позволяет не вносить дополнительные изменения в конструкцию оборудования. При этом сохраняется достаточно высокая достоверность постановки диагноза с учетом состояния АЭД.

Использование аппарата нечеткой логики дает возможность проведения диагностики АЭД в режиме реального времени и ее автоматизации. Также возможна быстрая модификация системы благодаря легкости формирования правил, что снизит время постановки первичного диагноза и увеличит его достоверность, в том числе и для специализированных АЭД.

Разработанный алгоритм на основе анализа текущих значений тока в обмотках статора показывает хорошую реакцию на наличие электрических дефектов и точно определяет ис-

правное состояние АЭД даже при предельной паспортной нагрузке. Дефекты электрической сети дополнительно могут определяться с удовлетворительной достоверностью, за исключением предельных случаев. Достоинством данной системы также является возможность замены тока в качестве параметров состояния на напряженность внешнего магнитного поля с сохранением соотношений $(B_{\text{тек}} + B_{\text{ном}}) / 2B_{\text{ном}}$.

Предлагаемая система позволяет дифференцировать виды основных электрических дефектов и степень их развития.

Проверена возможность включения в параметры состояния АЭД частотного состава спектров вибрации. В частности, рассмотрен случай использования в качестве параметров состояния вклада гармоник семейства пазовых и оборотных частот в общий уровень вибрации электродвигателя. В результате появилась возможность разделения механических и электрических дефектов АЭД.

Список литературы

1. Лукьянов А.В. Управление техническим состоянием роторных машин (система планово-диагностического ремонта). Иркутск : ИрГТУ, 2000. 229 с.
2. Nandi S., Toliyat A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review // IEEE transactions on energy conversion. 2005. Vol. 20, № 4. P. 32–37. DOI 10.1109/TEC.2005.847955.
3. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования : с изм. и доп. от 01.03.2001. М. : НЦ ЭНАС, 2004. 256 с.
4. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию решений. М. : Мир, 1976. 165 с.
5. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений // Математика сегодня. М. : Знание, 1974. С. 5–49.
6. Chow M.-Y., Bi L., Goddu G. Intelligent motor fault detection // Intelligent Techniques in Industry. Boca Raton FL: CRC Press, 1998. 352 p.
7. Исследование угловой скорости вращения ротора асинхронного двигателя при дефектах / А.В. Лукьянов, И.О. Бельский, И.С. Куприянов и др. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы девятой междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. Т. 2. С. 455–460.
8. Кувайскова Ю.Е., Алешина А.А. Техническая диагностика объектов с использованием методов нечеткой логики // Радиотехника. 2017. № 6. С. 32–34.
9. Advances in diagnostic techniques for induction machines / A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, Is. 12. P. 4109–4126.
10. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы электрических системах. М. : Энергия, 1970. 520 с.
11. Benbouzid M.E.H. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1999. Vol. 14, Is. 4. P. 1065–1074.
12. Никиян Н.Г., Митрофанов С.В., Омон А.Б. Электромагнитные процессы и токи трехфазного асинхронного двигателя при межвитковых коротких замыканиях // Электричество. 2010. № 5. С. 53–56.
13. Каширских В.Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей. Кемерово : КузГТУ, 2005. 139 с.
14. Incipient fault detection in induction machine stator-winding using a fuzzy-Bayesian two change points detection approach / F.S. Moreira, M.F.S.V. D'Angelo, R.M. Palhares et al. // 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON 2010). Sao Paulo, 2010. P. 1–6.
15. Гольдберг О.Д. Надежность электрических машин общепромышленного и бытового назначения. М. : Знание, 1976. 56 с.
16. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
17. Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles : master's Thesis. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2014. 68 p.
18. Асинхронные двигатели серии 4А / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин и др. М. : Энергоатомиздат, 1982. 504 с.
19. Кетков Ю.Л. Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 7 – программирование, численные методы. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 752 с.
20. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
21. Неразрушающий контроль и диагностика / под ред. В.В.Клюева. М. : Машиностроение, 2005. 656 с.

References

1. Luk'yanov A.V. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem rotornykh mashin (sistema planovo-diagnosticheskogo remonta) [Management of the technical condition of rotary machines (system of scheduled diagnostic repair)]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2000. 229 p.
2. Nandi S., Toliyat A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review. *IEEE transactions on energy conversion*. 2005, vol. 20, no. 4, pp. 32–37.
3. RD 34.45-51.300-97. Ob''em i normy ispytaniya elektrooborudovaniya (s izmeneniyami i dopolneniyami po sostoyaniyu na 01.03.2001) [RD 34.45-51.300-97. Scope and standards of testing of electrical equipment (with amendments and additions as of March 01, 2001)]. Moscow: NTs Enas Publ., 2004. 256 p.
4. Zadeh L.A. Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primeneniye k prinyatiyu reshenii [The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning]. Moscow: Mir Publ., 1976. 165 p.
5. Zadeh L.A. Osnovy novogo podkhoda k analizu slozhnykh sistem i protsessov prinyatiya reshenii [Fundamentals of a new approach to the analysis of complex systems and decision-making processes]. *Matematika segodnya* [Mathematics today], 1974, pp. 5–49.
6. Chow M.-Y., Bi L., Goddu G. «Intelligent motor fault detection» in *Intelligent Techniques in Industry*. Boca Raton FL: CRC Press, 1998.
7. Luk'yanov A.V., Bel'skii I.O., Kupriyanov I.S., Nazarov A.V. Issledovanie uglovoi skorosti vrashcheniya rotora asinkhronnogo dvigatelya pri defektakh [Investigation of the angular velocity of rotation of the rotor of an induction motor with defects]. *Materialy Devyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the 9th International Scientific-Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, vol. 2, pp. 455–460.
8. Kuvaiskova Yu.E., Aleshina A.A. Tekhnicheskaya diagnostika ob''ektov s ispol'zovaniem metodov nechetkoi logiki [Technical diagnostics of objects using fuzzy logic methods]. *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2017, no. 6, pp. 32–34.
9. Bellini A., Filippetti F., Tassoni C., Capolino G.-A. Advances in diagnostic techniques for induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008, vol. 55, no. 12, pp. 4109–4126.
10. Ul'yanov S.A. Elektromagnitnye perekhodnye protsessy elektricheskikh sistemakh [Electromagnetic transient processes in electrical systems]. Moscow: Energiya Publ., 1970. 520 p.
11. Benbouzid M.E.H. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1999, vol. 14, no. 4, pp. 1065–1074.
12. Nikiyan N.G., Mitrofanov S.V., Omon A.B. Elektromagnitnye protsessy i toki trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatelya pri mezhvitkovykh korotkikh zamykaniyakh [Electromagnetic processes and currents of a three-phase asynchronous motor with inter-turn short circuits]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2010, no. 5, pp. 53–56.
13. Kashirskikh V.G. Dinamicheskaya identifikatsiya asinkhronnykh elektrodvigatelyei [Dynamic identification of asynchronous electric motors]. Kemerovo: KuzGTU Publ., 2005. 139 p.
14. Moreira F.S., D'Angelo M. F. S. V., Palhares R.M., Caminhas W.M. Incipient fault detection in induction machine stator-winding using a fuzzy-Bayesian two change points detection approach. *9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON 2010*. Sao Paulo, 2010, pp. 1–6.
15. Gol'dberg O.D. Nadezhnost' elektricheskikh mashin obshchepromyshlennogo i bytovogo naznacheniya [Reliability of electrical machines for general industrial and household purposes]. Moscow: Znanie Publ., 1976. 56 p.
16. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965, vol. 8, pp. 338–353.
17. Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles : master's Thesis. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2014. 68 p.
18. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolevskaya E.A. Asinkhronnye dvigateli serii 4A [Asynchronous motors of the 4A series]. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 504 p.
19. Ketkov Yu.L., Ketkov A.Yu., Shul'ts M.M. MATLAB 7 – programmirovaniye, chislennyye metody [MATLAB 7 – programming, numerical methods]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg Publ., 2005. 752 p.
20. Shubov I.G. Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin [Noise and vibration of electrical machines]. Leningrad: Ehnergoatomizdat Publ., 1986. 208 p.
21. Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika [Non-destructive testing and diagnostics] / Edited by V.V. Klyuev. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2005. 656 p.

Информация об авторах

Куприянов Иван Сергеевич, старший преподаватель кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: xpress14@mail.ru.

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.

Information about the authors

Ivan S. Kupriyanov, Assistant Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: xpress14@mail.ru.

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

Разработка устройства регистрации и контроля параметров при циклических испытаниях сборных конструкций

О.Л. Маломыжев✉, Д.О. Маломыжев, А.А. Пыхалов, И.Н. Лебедев

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

✉olm@bk.ru

Резюме

Движение подвижного состава основывается на его безопасности и надежности, что напрямую связано с усталостной прочностью механической части, представляющей собой сборную конструкцию деталей, которые работают в условиях воздействия друг на друга. В данных обстоятельствах анализ усталостной прочности детали при натурных испытаниях в эксплуатации не дает полной оценки ее работоспособности, он также связан с существенными стоимостными и временными затратами. Для компенсации этих проблем в настоящей работе предлагается выполнять натурные испытания образцов деталей в лабораторных условиях. Такие испытания проводятся на специализированных стендах, позволяющих создать необходимое напряженно-деформированное состояние. Однако для осуществления полноценных лабораторных испытаний возникает необходимость в разработке не только механической части специализированных стендов, но и системы управления ими, а также системы контроля и регистрации получаемых данных (параметров). В статье предложена система контроля и регистрации параметров, получаемых при работе стенда для циклических испытаний деталей для сборных конструкций. Ее преимуществом является универсальность как важнейшее требование к таким системам, что обеспечивает возможность применения в различных конструкциях стендов анализа усталостной прочности. Особенность предлагаемой системы заключается в том, что контроль и регистрация параметров от циклической нагрузки реализованы с использованием микроконтроллера, который получает информацию с датчиков, определяющих величину текущего нагружения сборной конструкции с дальнейшей записью на носитель цифровой информации числа циклов и максимальной силы нагружения за каждый цикл. Также предусмотрена возможность продолжения усталостного испытания при нештатном отключении стенда или требуемого его останова, связанного со снижением силы воздействия на образец.

Ключевые слова

надежность, усталостная прочность, сборная конструкция, циклические испытания, микроконтроллер, регистрация параметров

Для цитирования

Разработка устройства регистрации и контроля параметров при циклических испытаниях сборных конструкций / О.Л. Маломыжев, Д.О. Маломыжев, А.А. Пыхалов, И.Н. Лебедев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 22–31. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).22-31.

Информация о статье

поступила в редакцию: 14.12.2022 г.; поступила после рецензирования: 15.03.2023 г.; принята к публикации: 16.03.2023 г.

Development of a registration and parameter control device for cyclic tests of prefabricated structures

O.L. Malomyzhev✉, D.O. Malomyzhev, A.A. Pykhalov, I.N. Lebedev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉olm@bk.ru

Abstract

The movement of rolling stock is based on its safety and reliability, which is directly related to the fatigue strength of the mechanical component which is a prefabricated structure whose parts work under conditions of impact on each other. Under the circumstances, the analysis of the fatigue strength of a part during full-scale tests under operation does not provide a complete assessment of its performance, it is also associated with significant cost and time losses. To compensate for these problems, it is proposed to perform full-scale tests of samples of parts in laboratory conditions. However, for the implementation of full-fledged laboratory tests, it becomes necessary to both develop a stand with control system, and a system for monitoring and registering the experimental results obtained. Such tests are carried out on specialized stands that allow to create the necessary stress-strain state. In the current work, a system for monitoring and recording parameters obtained during the operation of the stand performing the prefabricated structures cyclic tests has been developed. Its advantage is a universality as the most important requirement allowing the system to be used in stands for the fatigue strength tests. The control and regulation of parameters from the cyclic load is implemented on a microcontroller, which receives information from the sensor of the stand position and the current loading force of the prefabricated structure, with further recording of cycles and the maximum loading force for each cycle. It is also

possible to continue the fatigue test in case of an abnormal shutdown of the stand or its required shutdown associated with a given criterion for reducing the force of impact on the sample in the microcontroller program.

Keywords

reliability, fatigue strength, prefabricated construction, cyclic testing, microcontroller, registration of parameters

For citation

Malomyzhev O.L., Malomyzhev D.O., Pykhalov A.A., Lebedev I.N. Razrabotka ustroystva registratsii i kontrolya parametrov pri tsiklicheskih ispytaniyakh sbornykh konstruksii [Development of a registration and parameter control device for cyclic tests of prefabricated structures]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023. no. 1 (77), pp. 22–31. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).22-31.

Article info

Received: December 14, 2022; Revised: March 15, 2023; Accepted: March 16, 2023.

Введение

Оценка усталостной прочности узлов подвижного состава является значимой для их безопасности и надежности. При проектировании или внедрении новых конструкций [1–10] ее необходимо проводить посредством испытаний в лабораторных условиях. Эти испытания позволяют выполнить анализ деталей на образцах под нагрузкой, имитирующей воздействие других деталей в сборной конструкции, которая может быть задана из условий эксплуатации. При этом допускается некое упрощение по прилагаемой нагрузке, т.е. не обязательно полностью эмулировать реально эксплуатируемый аналог [11–15].

Многолетний опыт показал, что достаточно воспроизвести один вид нагружения для достоверной оценки усталостной прочности детали. По данной причине существуют частные виды нагружений, реализуемые специализированными стендами. Например, для оценки болтовых соединений или посадок с натягом была поставлена цель проектирования стенда для оценки усталостной прочности сборных конструкций при циклическом нагружении [16]. Данный стенд позволяет получить информацию о циклах и максимальной силе нагружения за цикл исходя из полученных данных. Также строится кривая Веллера, показывающая тенденцию разрушения деталей [17].

Проблемой реализации полноценных лабораторных испытаний является необходимость в разработке не только механической части специализированных стендов, но и систем контроля и регистрации получаемых данных (параметров).

Целью представленной работы является создание системы контроля и регистрации параметров от циклической нагрузки с использованием микроконтроллера, который получает ин-

формацию с датчиков, определяющих величину текущего нагружения сборной конструкции с дальнейшей записью данных на носитель цифровой информации в виде числа циклов и максимальной силы нагружения за каждый цикл.

Описание конструкции

Внешний вид стенда представлен на рис. 1, а его схема на рис. 2.



Рис. 1. Стенд циклических испытаний сборных конструкций

Fig. 1. Stand for cyclic testing of prefabricated structures

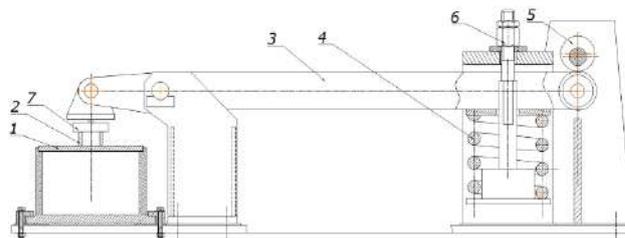


Рис. 2. Схема стенда циклических испытаний сборных конструкций

Fig. 2. Scheme of the stand for cyclic testing of prefabricated structures

Испытуемый образец 1, опирается на закрепленный на раме стенда полый цилиндр. Циклически изменяющаяся сила прикладывается к образцу толкателем 2, имеющим форму

полого цилиндра. Сила, воздействующая на образец, создается предварительно сжатой пружиной 4, через двуплечий рычаг 3, имеющий соотношение плечей 5/1, она может изменяться в диапазоне 0–100 кН. Сила предварительного сжатия пружины осуществляется винтовым регулировочным устройством 6. Значение силы измеряется тензометрическим датчиком 7. Снижение силы осуществляется эксцентриком 5, воздействующим на край рычага 3. Эксцентрик приводится во вращение червячным мотор-редуктором, обеспечивающим частоту вращения 0,83 Гц.

При разработке системы регистрации и контроля параметров при циклических испытаниях были поставлены основные требования, которым должен соответствовать стенд:

1. Схема системы регистрации и контроля параметров должна обеспечивать наибольшую простоту и надежность.

2. Датчик силы должен позволять формировать величину нагружения образца и обладать достаточной частотой формирования сигнала.

3. Микроконтроллер должен выполнять функцию регистрации и контроля параметров, поступающих с тензометрического преобразователя, с дальнейшей записью и хранением на флэш-накопителе.

4. Программа микроконтроллера должна обеспечивать сохранение и возврат к выполнению регистрации параметров при обесточивании или нештатном отключении стенда.

Регистрация и контроль параметров стенда для испытания усталостной прочности сборных конструкций реализованы на программируемом микроконтроллере, который регистрирует и контролирует входные параметры при проведении усталостных испытаний. Сигнал с входными данными поступает на микроконтроллер с блока преобразователя, к которому в свою очередь подключен силоизмерительный тензометрический датчик. Регистрация параметров происходит на съемный носитель.

Данное устройство регистрации и контроля параметров также связано с системой управления стенда для контроля начала и окончания испытания и с записью циклов нагружения, которые регистрируются микроконтроллером и объединяются в один файл с параметрами, регистрируемыми с тензометрического датчика. Данная информация также записывается на съемный носитель. На рис. 3 представлена блок

схема подключения устройств:

– «датчик Холла [18]» формирует импульс в момент максимального нагружения;

– «тензодатчик» формирует сигнал уровня нагружения;

– «тензопреобразователь» преобразует сигнал тензодатчика в цифровой вид и позволяет выполнить калибровку тензодатчика;

– «интерфейс передачи данных RS485» выполняет связь между тензопреобразователем и микроконтроллером «ардуино»;

– «6P индикатор» отображает число циклов нагружения;

– «4P индикатор» дублирует показания нагружения с тензопреобразователя;

– «часы реального времени» регистрируют время испытания;

– «сигнал останов» – автоматическая остановка стенда, если значение силы нагружения падает на заданный процент от исходной величины;

– «ардуино» выполняет обработку, регистрацию и сохранение параметров испытания, а также вывод информации с датчиков на индикаторы;

– «USB-интерфейс» выполняет связь между «ардуино» и флэш-накопителем для сохранения результатов испытания.

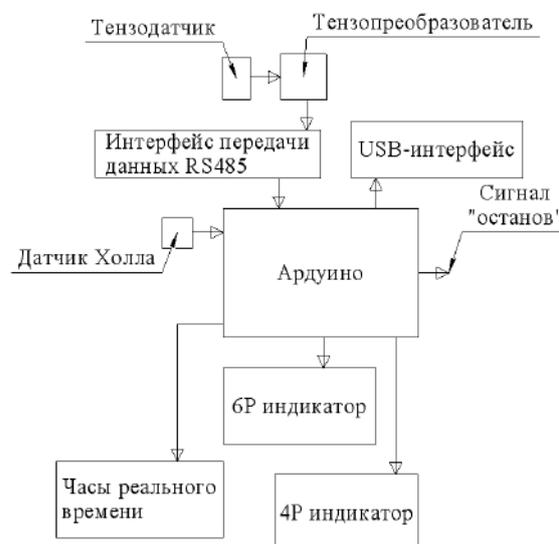


Рис. 3. Блок-схема подключения устройств
Fig. 3. Block-diagram for device connection

Снятие параметров нагружений реализовано тензометрическим датчиком LPA-10t шайбового типа (рис. 4). Диапазон измерения составляет до 100 кН.



Рис. 4. Датчик тензометрический
Fig. 4. Strain gauge

Основные технические характеристики тензометрического датчика измерения силы приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики тензометрического датчика
Table 1. Strain gauge specifications

Максимальная измеряемая сила, кН Maximum measured force, kN	100
Класс относительной погрешности, % Relative error class, %	C1
Допустимый диапазон изменения температуры, °К Permissible range of temperature changes °K	243–343
Максимальная нагрузка, кН Maximum load, kN	150
Нагрузка при разрушении, кН Breaking load, kN	200
Напряжение питания, В Supply voltage, V	5–12
Класс защиты Protection class	IP68
Предельное напряжение питания, В Ultimate supply voltage, V	Не более 15 Under 15
Упругий деформируемый элемент, материал Elastic deformable element, material	Легированная сталь Alloy steel

Выбранный датчик удовлетворяет всем предъявляемым требованиям.

Для снятия информации с силового тензометрического датчика использован промышленный весовой тензопреобразователь модели DT-50-A (рис. 5).



Рис. 5. Тензопреобразователь модели DT-50-A
Fig. 5. Strain gauge, model DT-50-A

Преобразователь позволяет формировать выходной сигнал в стандартах RS-232 и RS-485. Частота дискретизации аналогового сигнала составляет 1,2 кГц, что позволяет получить информацию об изменении воздействующей на образец силы за каждый оборот эксцентрика с дискретностью 0,5°. Основные технические характеристики тензопреобразователя модели DT-50-A приведены в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики тензопреобразователя DT-50-A
Table 2. Technical characteristics of strain gauge DT-50-A

Внешний интерфейс Front end	RS-232, RS485
Визуальная информация Visual information	OLED дисплей
Напряжение питания, В Supply voltage, V	24
Питание силоизмерительного датчика, В Power supply Sensor, V	5
Разрядность аналого-цифрового преобразователя, бит Analog-to-digital converter bit depth, bit	24
Диапазон входного сигнала, мВ Input signal range, mV	-39–39
Нелинейная погрешность, % Nonlinear error, %	0,001
Частота преобразования аналогового сигнала, кГц Analog signal conversion frequency, kHz	1,2
Разрядность OLED дисплея, бит Bit depth of the OLED display, bit	8
Тип крепления Mount type	DIN35
Диапазон рабочих температур, °К Operating temperature range, °K	243–343

Функционально OLED дисплей позволяет выполнять подстройку преобразователя без дополнительных устройств.

Датчик Холла двухполярный модели А3144 применяется в роли считывателя циклов нагружения сборной конструкции, а также в роли датчика позиционирования вала эксцентрика. Данный датчик показал себя как наиболее простой и безошибочно срабатывающий считыватель оборотов. Датчики Холла крепятся на кронштейн (рис. 6).

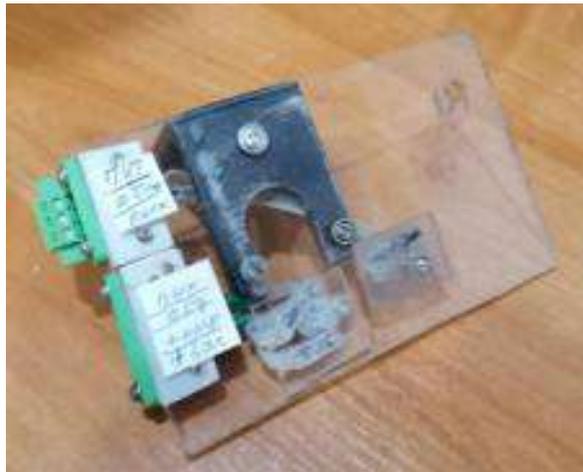


Рис. 6. Кронштейн для датчиков Холла
Fig. 6. Bracket for Hall sensors

Характеристики датчиков А3144 представлены в табл. 3.

Таблица 3. Датчик Холла А3144

Table 3. Hall sensor А3144

Напряжение питания, В Supply voltage, V	4,5 – 24
Плотность магнитного потока Magnetic flow density	нет ограничения no limitation
Потребляемый ток, мА Consumed current, mA	25
Диапазон рабочих температур, °С Range of operation temperatures, °C	-40 °С – 150 °С
Габаритные размеры, мм Overall dimensions, mm	4,17 × 1,57 × 19,36
Выходной сигнал Output signal	Логический 0 или 1 Logical 0 or 1

Для хранения полученной информации с датчиков применено энергонезависимое устройство хранения информации – флеш-накопитель формата SD-card (рис. 7).



Рис. 7. Устройство хранения полученной информации
Fig. 7. Received information storage device

Полученные в результате проведения испытаний данные могут быть обработаны с применением стандартных приложений – Matlab, Microsoft Excel и пр. Величина дискретности записи данных вводится в программу перед началом испытаний.

Количество циклов нагружения испытуемого изделия определяется в результате обработки результатов расчета, также предусмотрена возможность записи и счета количества циклов с использованием датчика Холла и вывода на цифровой индикатор (рис. 8).



Рис. 8. Индикатор усилия (а) и числа циклов (б)
Fig. 8. Force (а) and number of cycles (б) indicator

Дополнительно для продолжения испытания при его прерывании из-за отсутствия электропитания применены энергонезависимые часы, которые позволяют записывать время каждого цикла нагружения (рис. 9).



Рис. 9. Энергонезависимые часы
Fig. 9. Energy independent clock

Все ранее перечисленные компоненты подключаются к программируемому микроконтроллеру для управления ими (рис. 10).



Рис. 10. Микроконтроллер
Fig. 10. Microcontroller

Схема системы контроля и регистрации (рис. 11) включает в себя ранее перечисленные компоненты, а также внешний блок питания на 12 В и два герконовых выключателя.

Для начала измерительных работ на стенде требуется задать максимальную нагрузку на образец. Для того чтобы данная информация поступила в микроконтроллер, необходимо включить магнитом «герконовый выключатель 2». В результате сигнал с силоизмерительного датчика поступит на тензопреобразователь, откуда через порт RS585 – в микроконтроллер Arduino UNO и в итоге запишется в

постоянную память SD-card. Следующим шагом выполняется сброс числа циклов на нулевое значение «герконовым выключателем 1», также данная информация формируется в постоянную память в одну строку со значением силы. Информация о величине нагружения отображается на индикаторе силы, а сведения о числе циклов нагружения на индикаторе числа циклов. Система регистрации и контроля параметров готова к работе.

При работе стенда информация с силоизмерительного датчика записывается в память только в момент срабатывания датчика Холла,

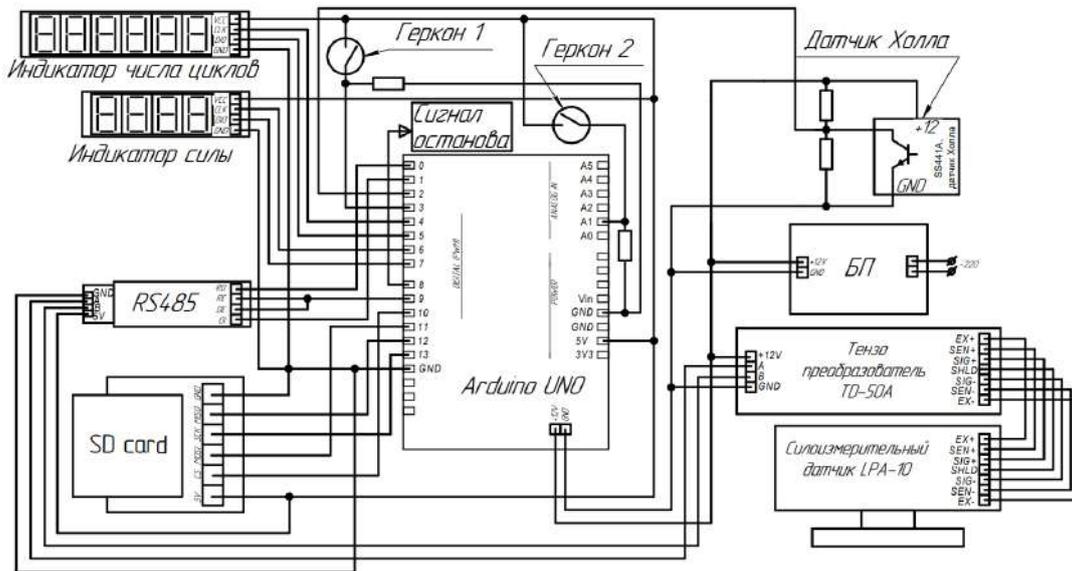


Рис. 11. Схема подключения компонентов к микроконтроллеру
 Fig. 11. Scheme of connecting components to the microcontroller

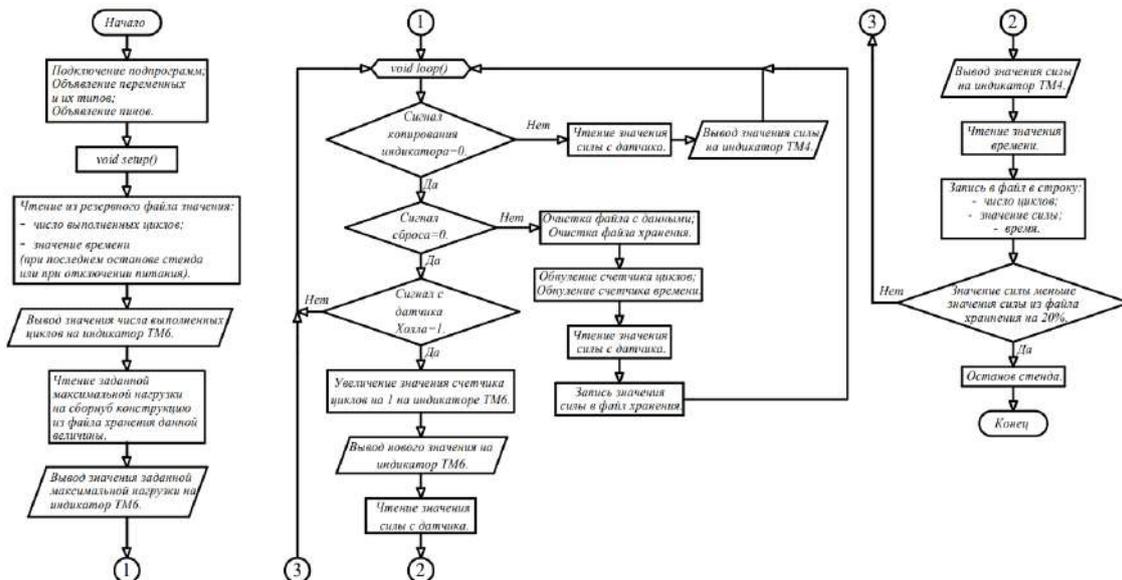


Рис. 12. Блок-схема алгоритма работы программы микроконтроллера
 Fig. 12. Block diagram of the microcontroller program operation algorithm

информирующего о том, что образец нагружен максимальной силой. Таким образом происходит регистрация и контроль параметров нагружения.

На рис. 12 представлена блок-схема программы микроконтроллера.

В начале работы программа инициализирует все подключенные устройства к микроконтроллеру. Следующим шагом программы является чтение из резервного файла хранения: число циклов; значение времени проведения испытания. При первом запуске значение числа циклов и времени – ноль. Данный файл необходим для резервирования информации о последнем числе циклов и времени нагружения, включая величину нагружения в случаях, когда установка была обесточена или была необходимость временно остановить испытания. Значения числа циклов выводятся на индикатор числа циклов. Далее задается величина нагружения образца, записывается в файл хранения и выводится на индикатор силы. Начиная с продолжения блок-схемы 1 (см. рис. 12) программа запускает циклическую работу. Если логическое значение копирования индикатора силы 0, то выполняется чтение величины нагружения с датчика силы и вывод его показания на индикатор;

если 1, то выполняется проверка на наличие сигнала сброса хранимой информации в файле хранения. При наличии логического 1 происходит сброс значений файла хранения, обнуление индикаторов и чтение новой исходной величины нагружения образца с ее регистрацией в файл хранения. При наличии логического 0 происходит переход к регистрации сигнала с датчика Холла. Если сигнал с датчика Холла логический 0, то программа выполняет заново все логические операции начиная с продолжения блок-схемы 1 (см. рис. 12). В ином случае, когда датчик Холла выдает логическую единицу, происходит приращение числа циклов на единицу с выводом обновленной информации на индикатор числа циклов. Далее происходит чтение значения нагружения с датчика силы, ее величина выводится на индикатор силы. Вместе с этим выполняется чтение текущего времени выполнения цикла. Вся полученная информация записывается в файл хранения в строчку: число циклов, значение силы, время. Если снятая величина силы меньше на 20 % величины прошлого измерения в файле хранения, то происходит остановка стенда, в ином случае работа программы переходит к последующей

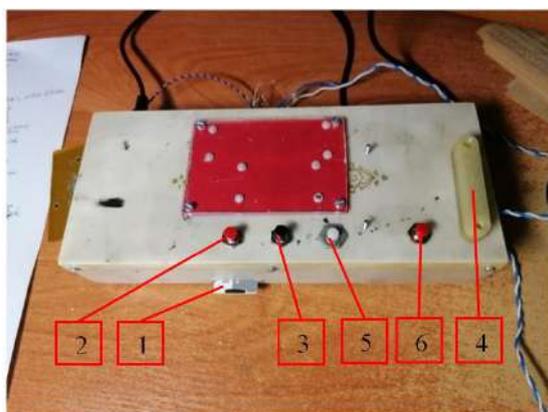


Рис. 13. Блок регистрации в сборе:

- 1 – SD-карта; 2 – кнопка установки приводного вала стенда в положении установки/замены образца;
- 3 – кнопка установки приводного вала стенда в положении максимальной нагрузки на образец;
- 4 – кнопка запуска двигателя установки; 5 – модуль RS-485; 6 – кнопка выключения двигателя установки

Fig. 13. Complete registration unit:

- 1 – SD card; 2 – the drive shaft installing button of the stand in the position of installing / replacing the sample;
- 3 – the drive shaft installing button of the stand in the position of maximum load on the sample;
- 4 – button to start the installation engine; 5 – RS-485 module; 6 – button for turning off the installation engine

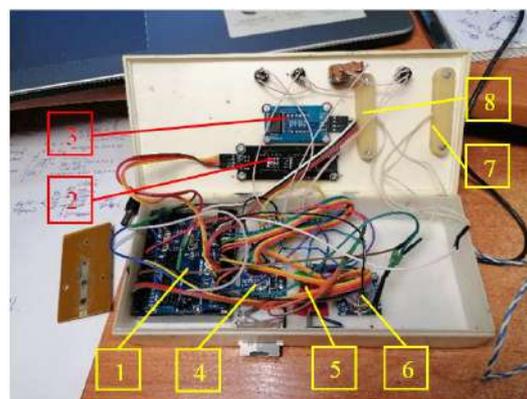


Рис. 14. Расположение модулей в корпусе:

- 1 – Arduino UNO; 2 – индикатор числа циклов; 3 – индикатор силы; 4 – модуль SD-карты; 5 – модуль RS-485; 6 – модуль часов реального времени; 7 – геркон включения режима создания заданной силы; 8 – геркон сброса

Fig. 14. Location of modules in the case:

- 1 – Arduino UNO; 2 – indicator of the number of cycles; 3 – strength indicator; 4 – SD card module; 5 – module RS-485; 6 – real time clock module;
- 7 – reed switch for enabling the mode of creating a given strength; 8 – reset reed switch

регистрации и контролю параметров начиная с продолжения блок-схемы 1 (см. рис. 12).

Все модули блока регистрации данных собраны в единый пластмассовый корпус (рис. 13, 14).

Расположенные на корпусе кнопки используются для управления приводным электродвигателем установки и не имеют непосредственной связи с блоком регистрации.

Использование системы регистрации при проведении испытаний осуществляется следующим образом.

Перед началом испытаний на SD-карте 1 (см. рис. 13) должны быть созданы два пустых файла текстового формата – «sila.txt» для хранения значения максимальной силы, воздействующей на образец по условиям испытаний, и «fr.txt» для хранения промежуточных значений силы, номера цикла и времени снятия показаний.

После включения питания установки необходимо нажать на кнопку 2 (см. рис. 13), при этом приводной вал установки повернется в положение установки/замены образца и остановится в данном положении. Необходимо установить в стенд испытуемый образец. Затем нужно нажать кнопку 3 (см. рис. 13), приводной вал повернется и остановится в положении максимальной нагрузки на образец. В данном положении требуется установить магнит 4 в положение, указанное на рис. 15. В данном положении на индикаторе силы (рис. 15) будет отображаться значение силы, воздействующей на образец. С помощью устройства нагружения необходимо создать нужную по условиям испытаний силу, далее – установить магнит 4 в поло-

жение, указанное на рис. 16, при этом значение заданной на образец силы будет записано в файл «sila.txt», а значения счетчика числа циклов и времени начала испытаний будут обнулены и записаны в файл «fr.txt». Установка готова к испытаниям. Для их проведения нажимается кнопка 5 (см. рис. 13) включения электродвигателя установки.

В процессе работы установки, после выполнения каждого цикла нагружения образца, на индикатор числа циклов (см. рис. 14) будет выведено значение номера цикла, а на индикатор силы (см. рис. 14) значение воздействующей максимальной силы на образец при текущем цикле. Значения номера цикла испытания, силы, воздействующей на образец при текущем цикле, и времени ее возникновения также будут записаны в файл «fr.txt» и в файл хранения полной информации о проведении испытаний.

Если возникает необходимость прервать испытания, следует нажать на кнопку 6 (см. рис. 13), при этом произойдет отключение приводного двигателя, затем можно полностью отключить питание установки. Для возобновления испытаний нужно включить электропитание установки и нажать кнопку 5 (см. рис. 13). При этом данные для продолжения испытаний будут считаны из файла «fr.txt».

В случае аварийного отключения питания данные сохраняются на SD-карте.

Заключение

1. При заключительном анализе системы измерения нагрузки, прикладываемой на испытуемый образец, были получены результаты, позволяющие оценивать ее величину по време-



Рис. 15. Задание силы
Fig. 15. Force assignment



Рис. 16. Обнуление числа циклов
Fig. 16. Resetting the number of cycles

ни (за каждый цикл нагружения), а также производить остановки испытаний при снижении прочности образца на заданную величину.

2. Система обеспечивает позиционирование эксцентрика вала, что позволяет задать максимальную нагрузку на образец и производить замену образца после завершения испытаний.

3. Полученная система регистрации и измерения нагружения образца обеспечивает высо-

кую точность измерения с дальнейшим сохранением данного значения на флеш-память, также достоинством является удобство измерения начальной максимальной силы нагружения при настройке стенда перед проведением испытаний.

4. Обеспечена возможность зрительного контроля информации о числе циклов и величине нагружения посредством цифровых индикаторов.

Список литературы

1. ГОСТ 33211–2014 Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Введ. 2016–07–01 М. : Стандартинформ, 2020. 56 с.
2. ГОСТ 33200–2014 Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. Введ. 2015–11–01. М. : Стандартинформ, 2015. 46 с.
3. ГОСТ 10791–2011 Колеса цельнокатаные. Технические условия. Введ. 2012–01–01. М. : Стандартинформ, 2011. 49 с.
4. ГОСТ 25.502–79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. Введ. 1981–01–01. М. : Стандартинформ, 2005. 25 с.
5. ГОСТ 25.507–85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования. Введ. 1986–07–01. М. : Стандартинформ, 2005. 19 с.
6. ГОСТ 25.101–83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. Введ. 1984–07–01. М. : Стандартинформ, 2005. 34 с.
7. ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. Введ. 1986–01–01. М. : Стандартинформ, 2005. 106 с.
8. ГОСТ 1497–84(ИСО 6892–84). Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 1986–01–01. М. : Стандартинформ, 2008. 24 с.
9. Когаев В.П. Расчет на прочность при напряжениях, переменных во времени. М. : Машиностроение, 1993. 354 с.
10. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. М. : Интернет инжиниринг, 2002. 288 с.
11. Голуб В.П. К решению задач усталости при двухосном комбинированном нагружении на основе классических критериев разрушения // Вестник двигателестроения. 2014. № 2. С. 139–146.
12. Вансович К.А., Ядров В.И. Двухосные испытания металлических образцов на испытательных машинах с одной осью нагружения // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 10–16.
13. Аистов И.П., Вансович К.А., Крючков А.Н. Исследование скорости роста усталостных трещин в алюминиевом сплаве АК6 в зависимости от характеристик напряженного состояния в области их распространения // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2013. № 2 (40). С. 68–76.
14. Зеньков Е.В., Цвик Л.Б., Пыхалов А.А. Дискретное моделирование напряженно-деформированного состояния плоскоцилиндрических образцов с концентраторами напряжений в виде канавок // Вестник ИрГТУ. 2011. №7. С. 64–69.
15. Ужик Г.В. Методы испытаний металлов и деталей машин на выносливость. М. : Изд. Академии наук СССР. 1948. 263 с.
16. Пат. 2717571 Рос. Федерация. Устройство для испытания пластинчатого образца на усталостную прочность // Г.И. Федюкович, Л.Б. Цвик, В.Н. Железняк и др. № 2019123504 ; заявл. 19.07.2019 ; опубл. 24.03.2020, Бюл. №9. 9 с.
17. Пат. 2360227 Рос. Федерация. Образец для оценки прочности материала при сложном напряженном состоянии // Л.Б. Цвик, А.П. Черепанов, А.А. Пыхалов и др. № 2007127572/28 ; заявл. 18.07.2007 ; опубл. 27.06.2009, Бюл. №18. 12 с.
18. Богомолов В.Н. Устройства с датчиками Холла и датчиками магнитосопротивления. М. : Госэнергоиздат, 1961. 168 с.

References

1. GOST 33211–2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [State Standard 33211–2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2020. 56 p.
2. GOST 33200–2014. Osi kolesnykh par zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard 33200–2014. Axles of wheelsets of railway rolling stock. General specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2015. 46 p.
3. GOST 10791–2011. Kolesa tsel'`nokatanye. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 10791–2011. All-rolled wheels. Specifications]. Moscow: Standartinform, 2011. 49 p.
4. GOST 25.502–79 Raschety i ispytaniya na prochnost' v mashinostroenii. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Metody ispytaniy na ustalost' [State Standard 25.502–79. Strength analysis and testing in machine building. Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue testing]. Moscow: Standartinform Publ., 2005. 25 p.
5. GOST 25.507–85. Raschety i ispytaniya na prochnost' v mashinostroenii. Metody ispytaniy na ustalost' pri ekspluatatsionnykh rezhimakh nagruzheniya. Obshchie trebovaniya [State Standard 25.507–85. Strength calculation and testing in machine building. Methods of fatigue testing under service loading. General requirements]. Moscow: Standartinform Publ., 2005. 19 p.
6. GOST 25.101–83. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody skhematizatsii sluchainykh protsessov nagruzheniya

elementov mashin i konstruktсии i statisticheskogo predstavleniya rezul'tatov [State Standard 25.101–83. Strength calculation and testing. Strength calculation and testing. Representation of random loading of machine elements and structures and statistical evaluation of results]. Moscow: Standartinform Publ., 2005. 34 p.

7. GOST 25.506–85. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoikosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhenii [State Standard 25.506–85. Design, calculation and strength testing. Methods of mechanical testing of metals. Determination of fracture toughness characteristics under the static loading]. Moscow: Standartinform Publ., 2005. 106 p.

8. GOST 1497–84 (ISO 6892–84). Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie [State Standard 1497–84 (ISO 6892–84). Metals. Methods of tension test]. Moscow: Standartinform Publ., 2008. 24 p.

9. Kogaev V.P. Raschet na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni [Calculation of strength at stresses, variable in time]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1993. 354 p.

10. Terent'ev V.F. Ustalostnaya prochnost' metallov i splavov [Fatigue strength of metals and alloys]. Moscow: Internet inzhiniring Publ., 2002. 288 p.

11. Golub V.P. K resheniyu zadach ustalosti pri dvukhosnom kombinirovannom nagruzhenii na osnove klassicheskikh kriteriev razrusheniya [To solve fatigue problems under biaxial combined loading based on classical fracture criteria]. *Vestnik dvigatelestroeniya* [Bulletin of engine building], 2014, no. 2, pp. 139–146.

12. Vansovich K.A., Yadrov V.I. Dvukhosnye ispytaniya metallicheskikh obraztsov na ispytatel'nykh mashinakh s odnoi os'yu nagruzheniya [Biaxial testing of metal samples on testing machines with one loading axis]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2020, no. 5 (173), pp. 10–16.

13. Aistov I.P., Vansovich K.A., Kryuchkov A.N. Issledovanie skorosti rosta ustalostnykh treshchin v alyuminievom splave ak6 v zavisimosti ot kharakteristik napryazhyonnogo sostoyaniya v oblasti ikh rasprostraneniya [Investigation of the growth rate of fatigue cracks in aluminum alloy amg6 depending on the characteristics of the stress state in the area of their propagation]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Vestnik of Samara State Aerospace University], 2013, no. 2 (40), pp. 68–76.

14. Zen'kov E.V., Tsvik L.B., Pykhalov A.A. Diskretnoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ploskotsilindricheskikh obraztsov s kontsentratormi napryazhenii v vide kanavok [Discrete modeling of the stress-strain state of plane-cylindrical samples with stress concentrators in the form of grooves]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2011, no. 7, pp. 64–69.

15. Uzhik G.V. Metody ispytaniy metallov i detalei mashin na vynoslivost' [Methods of testing metals and machine parts for endurance]. Moscow: Akademiya nauk SSSR Publ., 1948. 263 p.

16. Fedyukovich G.I., Tsvik L.B., Zheleznyak V.N., Ereemeev V.K., Bocharov I.S. Patent RU 2717571 C1, 24.03.2020.

17. Tsvik L.B., Cherepanov A.P., Pykhalov A.A., Khramenok M.A., Kuznetsov K.A., Shapova M.V. Patent RU 2360227 C2, 27.06.2009.

18. Bogomolov V.N. Ustroistva s datchikami Holla i datchikami magnitosoprotivleniya [Devices with Hall's sensors and magnetoresistance sensors]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1961. 168 p.

Информация об авторах

Маломыжев Олег Львович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olm@bk.ru.

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

Пыхалов Анатолий Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: rukhalov_aa@mail.ru.

Лебедев Иван Николаевич, аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: lebedev@mail.ru.

Information about the authors

Oleg L. Malomyzhev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olm@bk.ru.

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

Anatoliï A. Pykhalov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: pykhalov_aa@mail.ru.

Ivan N. Lebedev, Ph.D. Student of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: lebedev@mail.ru.

Разработка математической модели установки автоматизированной линии по получению исходного сырья из вторичных полимерных материалов для технологии послойного наплавления

Ш.С. Нозирзода✉, Т.-Б.Е. Мирзахмедов

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород, Российская Федерация
✉shoni_@mail.ru

Резюме

Для повышения производительности и обеспечения требуемой точности и качества выпускаемой продукции в технологическом процессе необходимо применять автоматизированные линии. Один из таких процессов – производство полимерной нити определяется возможностью применения вторичного сырья. В статье рассматриваются теоретические основы и моделирование установки автоматизированной линии для получения исходного сырья из вторичных полимерных отходов для технологии послойного наплавления. Целью данной работы является изучение динамических процессов установки для получения исходного сырья из вторичных полимерных материалов для технологии послойного наплавления. В соответствии с поставленными задачами в статье представлены разработка цифровой модели установки, а также математическая модель для исследования динамических процессов, которая реализована в программном продукте MatLab. Для моделирования установки составлена структурная схема, показывающая взаимосвязь между элементами системы. Определяются передаточная функция системы и амплитудно-частотные характеристики, позволяющие выявить рациональные параметры установки. Автоматизация процесса получения исходного материала для технологии послойного наплавления в виде полимерной проволоки из вторично переработанных отходов позволит уменьшить затраты на производство исходного материала и повысить производительность работ, сохраняя качественные показатели исходного материала, так как при вторичной переработке полимерные материалы изменяют свои физико-механические и химические свойства.

Ключевые слова

автоматизированная линия, моделирование, динамические процессы, вторичная переработка, качество продукции, исходное сырье, технология послойного наплавления

Для цитирования

Нозирзода Ш.С. Разработка математической модели установки автоматизированной линии по получению исходного сырья из вторичных полимерных материалов для технологии послойного наплавления // Ш.С. Нозирзода, Т.-Б.Е. Мирзахмедов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 32–40. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).32-40.

Информация о статье

поступила в редакцию: 1.11.2022 г.; поступила после рецензирования: 16.03.2023 г.; принята к публикации: 17.03.2023 г.

Development of a mathematical model for the installation of an automatic line for obtaining feedstock from secondary polymeric materials for layer-by-layer deposition technologies

Sh.S. Nozirzoda✉, T.-B. E. Mirzakhmedov

Yaroslav the Wise Novgorod State University
✉shoni_@mail.ru

Abstract

In order to increase productivity and ensure the required accuracy and quality of products, automated lines must be used in the technological process. One of such processes is the production of a polymer line for additive technologies, namely for layer-by-layer deposition technology. For the production of polymer thread, the possibility of using secondary raw materials is being considered. The paper considers the development of theoretical foundations and modeling of the installation of an automated line for obtaining raw materials from secondary polymer waste for the technology of the layered direction. The purpose of this work is theoretical modeling, the development of a digital model and the study of the dynamic processes of the installation for obtaining raw materials from secondary polymer materials for the technology of the layer-by-layer deposition. According to the tasks set in the work, a digital model of the installation was developed, a mathematical model for the study of dynamic processes, which is implemented in the MatLAB software product. To simulate the installation, a block diagram has been compiled that shows the relationship between the elements of the system. The transfer function of the system and the amplitude-frequency characteristics

are determined, which made it possible to identify the rational parameters of the installation. Automation of the process of obtaining the source material for the technology of layer-by-layer deposition in the form of polymer wire from recycled waste will reduce the cost of producing the source material and increase productivity, while maintaining the quality indicators of the consumable material, since polymer materials change their physical, mechanical and chemical properties during recycling.

Keywords

automated line, modeling, dynamic processes, recycling, product quality, raw materials, layer-by-layer deposition technology

For citation

Nozirzoda Sh.S., Mirzakhmedov T-B.E. Razrabotka matematicheskoi modeli ustanovki avtomatizirovannoi linii po polucheniyu iskhodnogo syr'ya iz vtorichnykh polimernykh materialov dlya tekhnologii posloynogo naplavleniya [Development of a mathematical model for the installation of an automatic line for obtaining feedstock from secondary polymeric materials for layer-by-layer deposition technologies]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77). pp. 32–40. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).32-40.

Article Info

Received: November 1, 2022; Revised: March 16, 2023; Accepted: March 17, 2023.

Введение

Процесс вторичной переработки полимерных отходов и создания новой продукции является довольно сложным. Первый фактор заключается в том, что отходы в виде полимеров представляют собой соединения, которые несовместимы друг с другом по термодинамическим свойствам. Вторым фактором является то, что большое количество полимеров – это композиционные материалы. Например, в состав многослойной пленочной упаковки входят слои бумаги, частицы металла [1].

Для улучшения качества вторичных полимеров их подвергают предварительной обработке. В зависимости от состояния отходов, их состава, степени деструкции и загрязненности они могут перерабатываться как смесь полимеров или разделяться на отдельные компоненты [1].

На данный момент направление аддитивных технологий, а именно 3D-печати по FDM-технологии стало широко распространяться и имеет большую сферу применения [2]. Свое применение оно нашло в создании прототипов, макетов, деталей, архитектурно-строительных объектов, медицинских изделий. На данный момент 3D-печать по FDM-технологии применяется во многих сферах деятельности. Встает острая проблема в изготовлении исходного материала по причине увеличения потребителей в данной сфере [3], возникает необходимость в обеспечении потребителей качественными и доступными расходным материалами для осуществления 3D-печати по FDM-технологии. Для повышения производительности процесса изготовления исходного материала из вторичного сырья необходимо применять современные средства автоматизации.

Анализ предшествующих работ показывает, что на данный момент существует необходимость в разработке автоматизированных линий по производству полимерной проволоки для технологии послойного наплавления. Автоматизация технологического процесса переработки и производства исходного материала (филамента) для технологии послойного наплавления повысит производительность при получении таких материалов и сократит производственные расходы.

Методика исследования

Целью работы является теоретическое моделирование, разработка цифровой модели и исследование динамических процессов установки для получения исходного сырья из вторичных полимерных материалов для технологии послойного наплавления. Объектом исследования являются конструктивные особенности данной установки.

Объектом исследования является конструктивные особенности установки для получения исходного сырья из вторичных полимерных материалов для технологии послойного наплавления.

Предметом исследования служит влияние основных параметров установки на динамические и частотные характеристики конструкции.

Методологическая база для выполнения данной работы включала: сравнительный анализ, моделирование, синтез, эксперимент, наблюдение, измерение, описание.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

– рассмотреть различные конфигурации автоматизированных линий и проанализировать

рациональный вариант конфигурации линии;

– разработать компоновочную схему автоматизированной линии и экструдера;

– разработать математическую модель для выявления частотных и динамических характеристик, обосновать оптимальные параметры установки;

– провести исследование по определению динамических характеристик установки.

Автоматизированную линию для переработки полимеров можно применять на предприятиях промышленного типа для изготовления исходного материала из переработанных вторичных материалов. Автоматизированная линия такого типа позволит получить качественные показатели для производимых полимеров и дистанционно управлять технологическим процессом. Она также может быть использована на предприятиях, занимающихся переработкой вторичного сырья с целью получения нового качественного материала.

Основными техническими параметрами [4], которые определяют количественные, качественные и стоимостные характеристики продукции являются:

1. Стабильность работы. Показывает, насколько установка на протяжении длительного времени работы сможет поддерживать заданные параметры как самих компонентов установки, так и производимого продукта.

2. Скорость переработки полимеров. Необходимо чтобы линия обладала высокой производительностью.

3. Способность линии к переработке различных видов полимеров. В сфере аддитивных технологий существует множество видов пластика. Одними из самых распространенных пластиков являются PLA (полилактид) и PET-G (полиэтилентерефталат-гликоль).

4. Температурный диапазон при нагревании. У каждого типа пластика есть своя рабочая температура плавления, необходимо чтобы установка могла обеспечивать как максимальную, так и минимальную температуру плавления, учитывая температуры плавления всех видов пластика.

Стандартный состав оборудования линии: одношнековый экструдер; гравиметрический, волюметрические дозирующие системы с различным количеством бункеров; фильтр-тестер; дозирующий насос для расплава; калибровочный инструмент; охлаждающие ванны; осушитель

филамента; лазерный контроль диаметра; вытяжное устройство; аккумулятор (компенсатор) филамента; намотчик филамента; панель оператора (контроль панель) 1–2 шт. [5–9].

Одним из главных компонентов в автоматической линии по производству полимерных материалов является экструдер. Подбор экструзионной установки определяется характеристиками перерабатываемого материала, а также требуемой производительностью на линии [9–12].

Производительность (Q , кг/с) экструдера можно определить по формуле (1):

$$Q = v \cdot T \cdot m \cdot i \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где v – скорость приема нити, м/с; T – линейная плотность формируемой нити, текс; m – число формовочных устройств, обслуживаемых одним экструдером; i – число нитей, формируемых на каждом рабочем месте [13].

Общая технологическая схема вторичной переработки полимерных отходов включает в себя:

1. Дробление сырья. Эта операция позволяет подготовить полимер для дальнейших этапов очистки и смешивания. Высокое и равномерное качество дробления позволит повысить характеристики итогового сырья. Современные технологии предлагают измельчение полимеров с помощью охлаждения. Таким образом можно получить фракции от 0,5 до 2 мм.

2. Промывка. Измельченное сырье очищают от загрязнений в несколько этапов с использованием специальных моющих средств.

3. Высушивание. Перед нагревом необходимо просушить полученный и промытый порошок в центрифугах. Финальный процесс сушки проходит в специальных установках. На выходе влажность продукта составляет 0,2 %.

4. Подготовленное сырье попадает в экструзионную установку, где оно расплавляется и перемешивается, при необходимости на данном этапе добавляются присадки. На выходе получается продукт – пластиковая проволока или гранулят, в зависимости от типа установки.

5. Намотка. Наматывается готовое сырье в качестве нити на катушку. В работе рассматривается автоматизация технологической схемы вторичной переработки полимерных отходов и производства филамента (рис. 1).

Изучив источники [14–17], можно сформулировать функционально-конструктивные требования к автоматизированной линии данного типа:

- высокая надежность;
- унифицированная конструкция;
- высокая производительность;
- оптимальный диапазон рабочей температуры нагрева сырья;
- высокая скорость экструзии;
- высокая прочность и жесткость;
- экструдер должен быть оснащен фильтром для расплава сырья;
- наличие форсунок для протяжки проволоки диаметром 1,75 и 2,85 мм;
- применение в установке широко распространенных и сертифицированных комплектующих;
- наличие модульной компоновки с функцией «горячей» замены;
- наличие нескольких систем защиты от сбоя и аварийной остановки;
- наличие датчиков температуры, скорости, присутствия сырья.

Разрабатываемая автоматизированная система для переработки пластиковых отходов в

пластиковые нити, которые предпочтительно используются в 3D-печати, состоит из нескольких основных частей:

- шредер для измельчения крупных пластиковых отходов в пластиковые гранулы;
- конвейерные ленты для транспортировки измельченных пластиковых гранул;
- очистительные бассейны для удаления инородных тел;
- сушилки горячего воздуха для снижения воды в пластиковом грануляте после очистки;
- экструдер для формирования пластикового гранулята в пластиковые нити;
- автоматический механизм для намотки пластиковых нитей на специальные валики (рис. 2).

Пластиковые отходы, подлежащие переработке, сначала подают в шредер через бункер. По возможности используемые пластиковые отходы должны состоять не из разных видов пластика, а только из одного, чтобы не

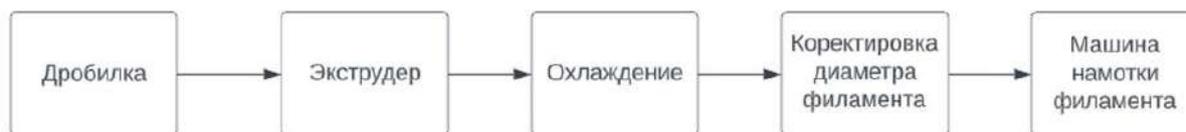


Рис. 1. Технологическая схема вторичной переработки полимерных отходов и производства филамента

Fig. 1. Technological scheme of polymer waste recycling and filament production

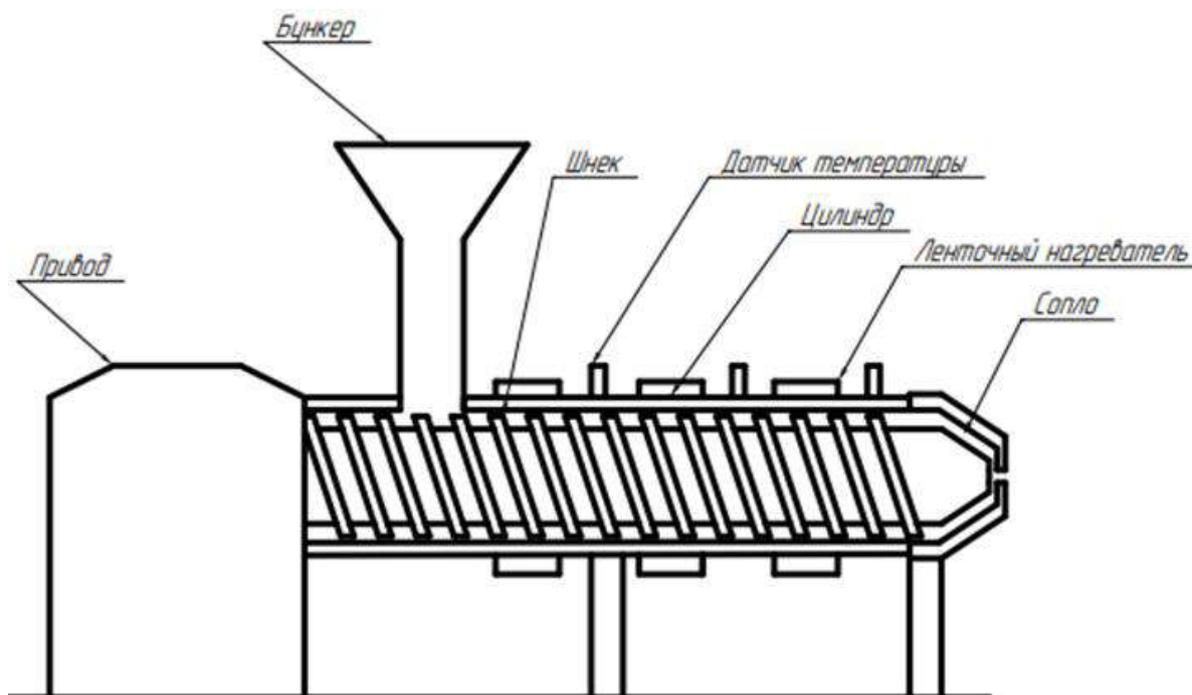


Рис. 2. Схема работы экструдера для переработки полимерного вторичного сырья

Fig. 2. Operation diagram of the extruder for processing polymer secondary raw materials

страдало качество последующего продукта. Измельченные в шредере пластиковые детали, которые теперь имеют вид гранул, транспортируются дальше по конвейеру до бассейна, где они очищаются от инородных тел. После очистки гранулы транспортируются на другой конвейер для сушки. В специальной сушилке, в которую гранулы поступают через бункер, содержание жидкости уменьшается под воздействием горячего воздуха. После сушки очищенные и высушенные гранулы поступают непосредственно в экструдер, где они расплавляются и формируются в нити. По мере выхода из экструдера через сопло нить охлаждается. Это предотвращает ее деформацию, которая может повлиять на качество готовой нити. С помощью автоматического механизма охлажденная нить наматывается на специальные валики. Когда на валик намотано максимальное количество нити, валик автоматически заменяется пустым.

Одним из главных компонентов автоматизированной линии является экструдер, который осуществляет технологическую схему (рис. 3). В связи с этим очень важно изучение его динамических процессов во время работы, поэтому более подробно рассматривается конструкция экструдера как технологического инструмента для производства филамента.

Для изучения динамических процессов конструкции необходимо рассмотреть ее схему более подробно, определить параметры вибрационной системы. Также нужно описать массу каждого элемента, обобщить и разработать схему установки.

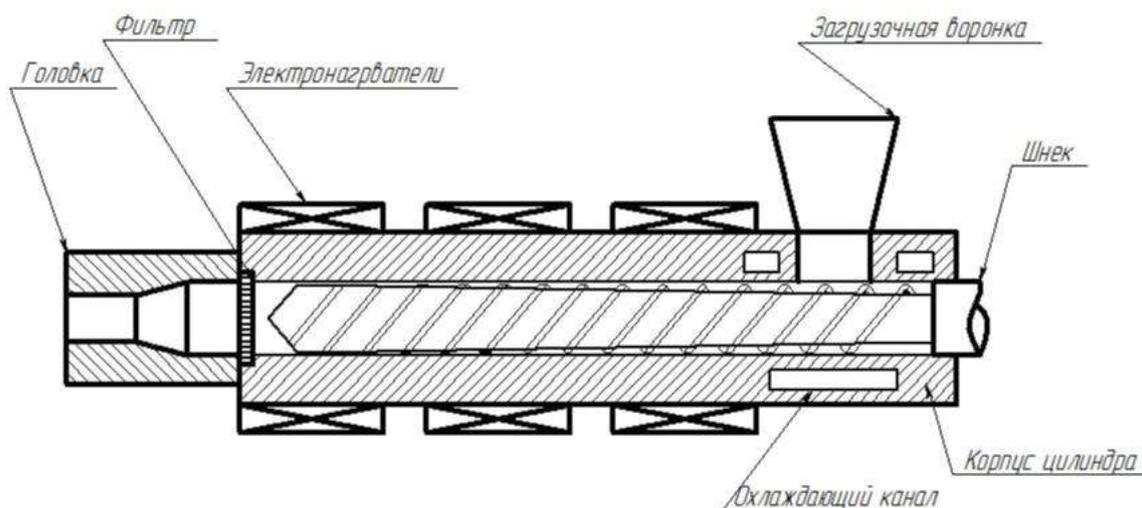


Рис. 3. Схема конструкции экструдера
Fig. 3. Design diagram of the extruder

Результаты исследования

Для правильного выбора рациональных вариантов параметров установки рассмотрим его в качестве двухмассовой вибрационной системы (рис. 4).

В системе m_1 – корпус установки, жестко скрепляемый с остальными элементами. Масса m_2 – шнек, который соединяется с корпусом.

В данной системе сила F является внешней силой для тела с массой m_2 и ее значение принимаем как постоянное. Силы сопротивления – сила упругости F_{c1} и демпфирование F_{h1} . Сила, которая служит силой сопротивления для массы m_2 , является также внешним воздействием для тела с массой m_1 . В данном случае сила F_{ext} – сила сопротивления для массы m_1 , при этом сила F_{ext} будет переменной.

Исходя из расчетной схемы баланса каждого тела можно составить следующие дифференциальные уравнения:

– для первой массы –

$$F_{cext} = F_{c1} + F_{m1} + F_{h1},$$

$$C_{ext} \cdot (X_{ext1} - X) = C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (V_1 - V_2) + m_2 \cdot a_1,$$

$$a_1 = \frac{C_{ext} \cdot (X_{ext1} - X_1) - C_1 \cdot (X_1 - X_2) - h_1 \cdot (V_1 - V_2)}{m_1},$$

– для второй массы –

$$F_{c1} + F_{h1} = F_{m2} + F_t;$$

$$C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (V_1 - V_2) = m \cdot a_2 + h_2 \cdot V_2,$$

$$a_2 = \frac{C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (V_1 - V_2) - F_t}{m_2}.$$

Составляем систему дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx_1}{dt} = V_1; \\ \frac{dV_1}{dt} = \frac{C_{ext} \cdot (X_{ext} - X_1) - C_1 \cdot (X_1 - X_2) - h_1 \cdot (V_1 - V_2)}{m_1}; \\ \frac{dx_2}{dt} = V_2; \\ \frac{dV_2}{dt} = \frac{C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (V_1 - V_2) - F_t}{m_2}. \end{array} \right.$$

Полученные дифференциальные уравнения решаем с помощью составленной программы в среде MatLab.

Выбираем параметры: $m_1 = 50$ кг; m_2

$= 200$ кг; $C_1 = 70\,000$ Н/м; $C_{ext} = 40\,000$ Н/м; $h_1 = 10$ Н · с/м; $F_t = 50$ Н; $A = 0,004$ м; $f_w = 60$ Гц; $X_{ext} = A \cdot \sin \omega t$.

По формуле угловой скорости находим собственную частоту каждого тела:

$$f_{соб.1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{C_{ext} + C_1}{m_1}},$$

$$f_{соб.2} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{C_1}{m_2}}.$$

По составленным системам дифференциальных уравнений получим графики перемещений и скоростей первого и второго тела (рис. 5).

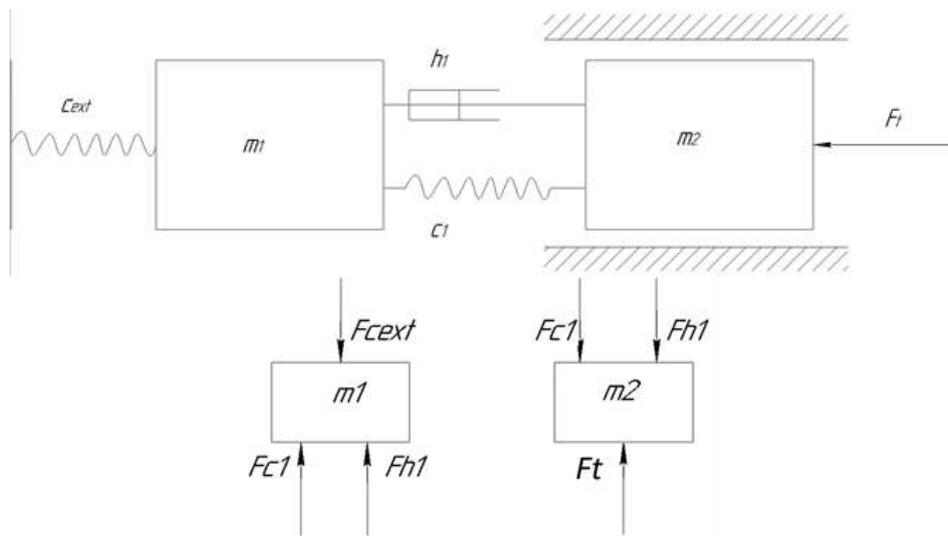


Рис. 4. Расчетная схема для моделирования
Fig. 4. Calculation scheme for modeling

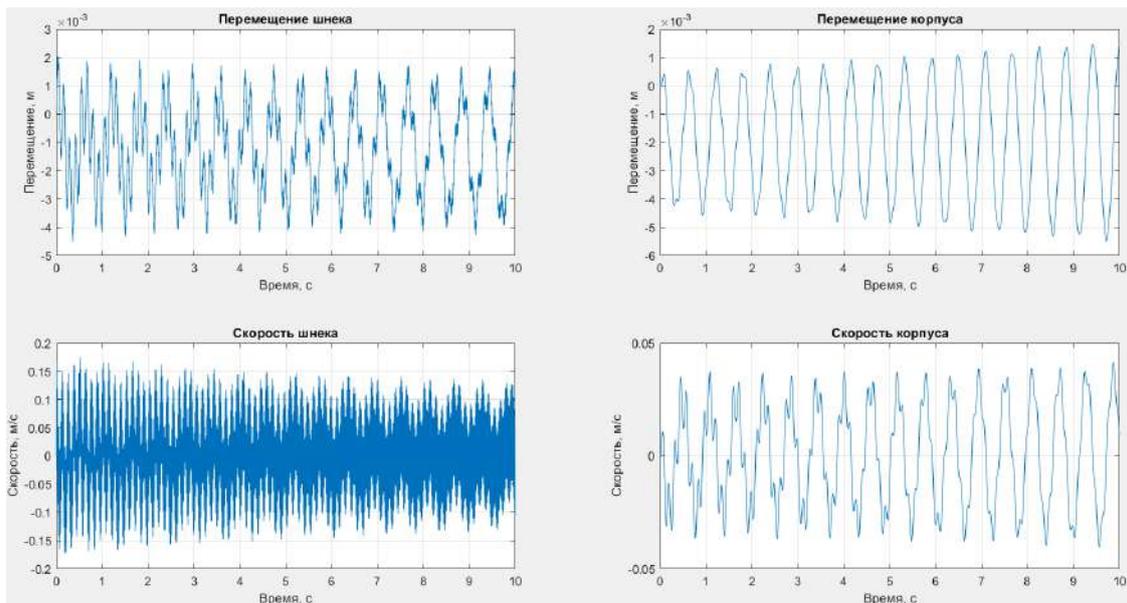


Рис. 5. Графики перемещения и скорости шнека и корпуса экструдера
Fig. 5. Graphs of the movement and speed of the screw and the extruder body

Проведен анализ параметров, которые влияют на амплитуду колебания второго тела. С изменением C_{ext} и F_t изменяется амплитуда колебания второго тела. При исследовании системы было выявлено, что при повышении жесткости пружины увеличивается амплитуда колебания второго тела. Также при росте коэффициента демпфирования уменьшается амплитуда колебания второго тела. Оптимальные параметры для данной системы $C_{ext} = 40\,000$ Н/м, $h = 100$ Н · с/м.

В данной работе также были выявлены амплитудно-частотные характеристики двухмассовой вибрационной системы. Для определения амплитудно-фазовой и частотной характеристики данной системы необходимо составить передаточную функцию и описать заданными параметрами. Передаточной функцией системы называется отношение выходной величины к входной, представленных в операторной форме или в функции комплексного переменного p .

Для определения амплитудно-фазовых частотных характеристик системы необходимо найти передаточную функцию [18]:

$$W(p) = \frac{X_2}{X_{ext}}$$

$$\begin{cases} C_{ext} \cdot (X_{ext} - X_1) = C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (V_1 - V_2) + m_1 \cdot a_1 \\ C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (V_1 - V_2) = h_2 \cdot V + m_2 \cdot a_2. \end{cases}$$

$$V = pX, \quad \frac{d}{dt} X = pX.$$

$$\begin{cases} C_{ext} \cdot (X_{ext} - X_1) = C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (pX_1 - pX_2) + m_1 \cdot p^2 \cdot X_1 \\ C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (pX_1 - pX_2) = m_2 \cdot p^2 \cdot X_2 + h_2 \cdot pX_2. \end{cases} \quad (2)$$

Из второго уравнения системы (2) находим X_1 :

$$X_1 = \frac{m_2 \cdot p^2 \cdot X_2 + h_2 \cdot pX_2 + C_1 X_2 + h_1 pX_2}{C_1 + h_1 p}.$$

Подставляем X_1 в первое уравнение и находим $\frac{X_2}{X_{ext}}$:

$$W(p) = \frac{X_2}{X_{ext}} = \frac{C_{ext} \cdot C_1 + h_1 \cdot p \cdot C_{ext}}{\begin{bmatrix} m_1 m_2 p^4 + h_2 m_2 p^3 + \\ + h_2 \cdot m_1 \cdot p + h_1 m_1 p - \\ - C_1 h_2 p m_2 + h_1 p X_1 + m_1 p^2 + \\ + C_{ext} - (C_1 + h_1 \cdot p^2) \end{bmatrix}}$$

Введем все данные в программный продукт MatLab и получим амплитудно-

частотные характеристики системы, которые показывают ее устойчивость при оптимальных параметрах (рис. 6).

Заключение

В работе предложен рациональный вариант схемы компоновки конструкции автоматизированной линии. После анализа особенностей конструкции экструдера была разработана расчетная схема для разработки математической модели.

Конструкция экструдера рассматривалась как двухмассовая система для изучения динамических характеристик. Исследуя динамические характеристики двухмассовой системы с помощью программного продукта MatLab, можно оптимизировать параметры технологической системы. Необходимо отслеживать частоты технологического оборудования, чтобы они не совпадали. Полученные графики перемещений и скоростей корпуса и шнека показывают, что выбранные в ходе анализа параметры удовлетворяют условиям компоновки экструдера.

В ходе работы был проведен спектральный анализ и определены амплитудно-частотные характеристики для конструкции экструдера как двухмассовой системы. Из графиков амплитудно-фазовых частотных характеристик видно, что данная динамическая система является устойчивой.

Таким образом, свойства конечной продукции в процессе вторичной переработки полимеров зависят от исходного полимера, метода переработки и числа циклов переработки, а также от наличия кислорода в среде и добавления стабилизаторов. Автоматизация данного процесса обеспечивает качественные показатели вторичного сырья из полимеров и позволяет регулировать основные свойства полимеров при вторичном использовании, что способствует повышению качества исходного материала.

Линия автоматизированной переработки вторичных полимеров будет использоваться на заводах и фабриках, связанных с производством упаковки, бытовых и промышленных полимерных изделий. Рециклинг пластмасс является сложным, но необходимым технологическим процессом. Автоматизация всех этапов данного процесса удешевляет и стабилизирует качество получаемого материала.

Список литературы

1. Лобанов В.С., Емельянов А.Н. Проблемы строительства на набухающих глинистых грунтах // Молодежь и наука : сб. материалов VIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 2012. С. 423–427.
2. Всё о 3D-печати. Аддитивное производство. Основные понятия // 3D TODAY : сайт : URL: https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology (Дата обращения: 10.10.2022).
3. Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство // 3D TODAY : сайт : URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/rynok-tekhnologii-3d-pecati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologii-v-proizvodstvo> (Дата обращения: 10.10.2022).
4. Машины серии Scientific для переработки полимеров: лабораторные и пилотные линии // LabTech Engineering : сайт. URL: <http://labtechengineering.ru/assets/catalog.pdf> (Дата обращения: 10.10.2022).
5. Устройства для экструдирования полимеров // Современные технологии производства. Ehtxe.com : сайт. URL: <https://extxe.com/7186/ustrojstva-dlja-jekstrudirovaniya-polimerov/#1> (Дата обращения: 10.10.2022).
6. Еренков О.Ю., Исаев С.П., Яворский Д.О. Модернизированное устройство для вторичной переработки полимеров // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 6. С. 7–9.
7. Койфман Г.А., Нозирзода Ш.С. Переработка вторичного сырья из полимера для 3D-печати // Химия. Экология. Урбанистика. 2021. Т. 1. С. 319–324.
8. Пат. 156861 Рос. Федерация. Экструдер для переработки вторичных полимеров / В.В. Дядичев, А.В. Колесников. № 2015122964/05 ; заявл. 15.06.2015 ; опубл. 20.11.2015, Бюл. №32. 1 с.
9. Хрулев А.К. Современные технологии переработки вторичных полимеров // Сборник материалов III Молодежно-го Экологического Форума. Кемерово, 2015. С. 81.
10. Лутфуллаев С.Ш., Бекназаров Э.М. Исследование физико-химических и механических свойств полимеров из промышленных отходов при их вторичной переработке // Universum: технические науки. 2021. № 12-4(93). С. 80–83.
11. Бекназаров Э.М., Лутфуллаев С.Ш., Сайдалов Ф.М. Исследование ИК-спектры при переработке вторичных полимеров // Universum: технические науки. 2021. № 5-4(86). С. 24–29.
12. Синева Н.В., Макеев П.В., Беляев П.С. Разработка технологии и оборудования по вторичной переработке отходов полимеров // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент : материалы IX Междунар. науч.-инновац. молодеж. конф. Тамбов, 2017. С. 161–163.
13. Процессы и оборудование производства волокнистых и пленочных материалов / И.Н. Жмыхов, Л.С. Гальбрайт, А.В. Акулич и др. Минск : Выш. шк., 2013. 587 с.
14. Петрушева Н.А., Алашкевич Ю.Д., Чистова Н.Г. Математическая модель процесса обработки вторичного волокна в производстве древесноволокнистых плит // Химия растительного сырья. 2002. № 4. С. 49–53.
15. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор) часть 2. Автоматизированная выкладка волокон (AFP) / П.Н. Тимошков, В.А. Гончаров, М.Н. Усачева и др. // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). С. 117–127.
16. Сорокин К.Н., Сорокин Н.Т., Пестряков Е.В. Современные подходы к автоматизации и цифровизации оборудования при разработке технологических линий // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67. № 4 (41). С. 96–103.
17. Автоматизация технологической линии и качество продукции / Р. Ганжав, П. Алтанцээг, Д. Батдулам и др. // Проблемы механики современных машин : материалы VI Междунар. конф. Улан-Удэ, 2015. Т. 1. С. 41–44.
18. Разработка эталонных передаточных функций систем / Ю.П. Добробаба, А.Г. Мурлин, В.А. Мурлина и др. // Изв. высш. учеб. заведений. Пищевая технология. 2000. № 1(254). С. 86–88.

References

1. Lobanov V.S., Emelyanov A.N. Problemy stroitel'stva na nabukhayushchikh glinistykh gruntakh [Problems of construction on swelling clay soils]. *Materialy VIII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh «Molodezh' i nauka»* [Proceedings of the VIII All-Russian Scientific-technical conf. of students, postgraduates and young scientists «Youth and science»]. Krasnoyarsk, 2012, pp. 423–427.
2. Vse o 3D-pechati. Additivnoe proizvodstvo. Osnovnye ponyatiya (Elektronnyi resurs) [All about 3D printing. Additive manufacturing. Basic concepts (Electronic resource)]. Available at: https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology (Accessed October 10, 2022).
3. Rynok tekhnologii 3D-pechati v Rossii i mire: perspektivy vnedreniya additivnykh tekhnologii v proizvodstvo (Elektronnyi resurs) [3D printing technology market in Russia and the world: prospects for the introduction of additive technologies into production (Electronic resource)]. Available at: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/rynok-tekhnologii-3d-pecati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologii-v-proizvodstvo> (Accessed October 10, 2022).
4. Mashiny serii Scientific dlya pererabotki polimerov: laboratornye i pilotnye linii (elektronnyi resurs) [Scientific series machines for polymer processing: laboratory and pilot lines (Electronic resource)]. Available at: <http://labtechengineering.ru/assets/catalog.pdf> (Accessed October 10, 2022).
5. Ustroistva dlya ekstrudirovaniya polimerov (Elektronnyi resurs) [Devices for polymer extrusion (Electronic resource)]. Available at: <https://extxe.com/7186/ustrojstva-dlja-jekstrudirovaniya-polimerov/#1> (Accessed October 10, 2022).
6. Erenkov O.Yu., Isaev S.P., Yavorskii D.O. Modernizirovannoe ustroistvo dlya vtorichnoi pererabotki polimerov [Modernized device for recycling polymers]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Recovery. Modernization], 2020, no. 6, pp. 7–9.
7. Koifman, G.A., Nozirzoda Sh.S. Pererabotka vtorichnogo syr'ya iz polimera dlya 3D-pechati [Processing of second-

ary raw materials from polymer for 3D printing]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika* [Chemistry. Ecology. Urbanistics], 2021, vol. 2021-1, pp. 319–324.

8. Dyadichev V.V., Kolesnikov A.V. Patent RU 156861 U1, 20.11.2015.

9. Khrulev A.K. Sovremennye tekhnologii pererabotki vtorichnykh polimerov [Modern technologies of secondary polymer processing]. *Sbornik materialov III Molodezhnogo Ekologicheskogo Forum* [Proceedings of the III Youth Environmental Forum]. Kemerovo, 2015, pp. 81.

10. Lutfullaev S.S., Beknazarov E.M. Issledovanie fiziko-khimicheskikh i mekhanicheskikh svoystv polimerov iz promyshlennykh otkhodov pri ikh vtorichnoi pererabotke [Investigation of physic-chemical and mechanical properties of polymers from industrial waste during their recycling]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences], 2021, no. 12-4 (93), pp. 80–83.

11. Beknazarov E.M., Lutfullaev S.S., Saidalov F.M. Issledovanie IR-spektry pri pererabotke vtorichnykh polimerov [Investigation of IR-spectra in the processing of secondary polymers]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences], 2021, no. 5-4 (86), pp. 24–29.

12. Sineva N.V., Makeev P.V., Belyaev P.S. Razrabotka tekhnologii i oborudovaniya po vtorichnoi pererabotke otkhodov polimerov [Development of technology and equipment for recycling polymer waste]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-innovatsionnoi molodezhnoi konferentsii «Sovremennye tverdogaznye tekhnologii: teoriya, praktika i innovatsionnyi menedzhment»* [Proceedings of the IX International Scientific and Innovative Youth Conference «Modern solid-phase technologies: theory, practice and innovation management»]. Tambov, 2017, pp. 161–163.

13. Zhmykhov I.N., Gal'braikh L.S., Akulich A.V., Shcherbina L.A., Sorokin F.A. Protsessy i oborudovanie proizvodstva voloknistykh i plenochnykh materialov [Processes and equipment for the production of fibrous and film materials]. Minsk: Vysheishaya shkola Publ., 2013. 587 p.

14. Petrusheva N.A., Alashkevich Yu.D., Chistova N.G. Matematicheskaya model' protsessa obrabotki vtorichnogo volokna v proizvodstve drevsnovoloknistykh plit [Mathematical model of the process of processing secondary fiber in the production of fiberboard]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of vegetable raw materials], 2002, no. 4, pp. 49–53.

15. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrul'kov A.V. Razvitie avtomatizirovannoi vykladki: ot istokov do nashikh dnei (obzor) chast' 2. Avtomatizirovannaya vykladka volokon (AFP) [Development of automated layout: from the origins to the present day (review) part 2. Automated fiber layout (AFP)]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and Technologies], 2021, no. 3 (64), pp. 117–127.

16. Sorokin K.N., Sorokin N.T., Pestryakov E.V. Sovremennye podkhody k avtomatizatsii i tsifrovizatsii oborudovaniya pri razrabotke tekhnologicheskikh liniy [Modern approaches to automation and digitalization of equipment in the development of technological lines]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK* [Electrotechnologies and electrical equipment in the agro-industrial complex], 2020, vol. 67, no. 4 (41), pp. 96–103.

17. Ganzhav R., Altantssetseg P., Batdulam D., Huhuu D. Avtomatizatsiya tekhnologicheskoi linii i kachestvo produktsii [Automation of the technological line and product quality]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi konferentsii «Problemy mekhaniki sovremennykh mashin»* [Proceedings of the VI International Conference «Problems of Mechanics of modern machines»], Ulan-Ude, 2015, vol. 1, pp. 41–44.

18. Dobrobaba Yu.P., Murlin A.G., Murlina V.A., Koshkin G.A., Akulov O.V., Grigor'ev V.V. Razrabotka etalonnykh pereda-tochnykh funktsii sistem [Development of reference transfer functions of systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya* [Bulletins of higher educational organization. Food technology], 2000, no. 1 (254), pp. 86–88.

Информация об авторах

Нозирзода Шодмон Салохидин, аспирант кафедры промышленных технологий, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород; e-mail: shoni_1997@mail.ru.

Мирзахмедов Темир-Бек Эркинович, кафедра автоматизации технологических процессов и производств, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород; e-mail: s245228@std.novsu.ru.

Information about the authors

Shodmon S. Nozirzoda, Ph.D. Student of the Department of Industrial Technologies, Yaroslav the Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod; e-mail: shoni_1997@mail.ru.

Temir-Bek E. Mirzakhmedov, Department of Automation of technological processes and productions, Yaroslav the Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod; e-mail: s245228@std.novsu.ru.

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

ТРАНСПОРТ

TRANSPORT

Анализ статистики срабатывания защиты фидеров контактной сети на примере Забайкальской железной дороги

А.В. Роголёв✉, О.С. Соловьёва, А.Г. Емельянов

Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита, Российская Федерация

✉a_rogalev@inbox.ru

Резюме

В статье рассмотрен вопрос повышения надежности систем тягового электроснабжения с позиции работы релейной защиты. Обозначены проблемы ОАО «РЖД», с которыми компания столкнулась при создании стратегии развития в ходе анализа текущего состояния инфраструктуры. Исследованы некоторые вопросы и задачи развития инфраструктуры холдинга, в том числе влияние поездов повышенной массы при одновременном стремлении к сокращению межпоездного интервала на снижение надежности системы тягового электроснабжения с точки зрения работы релейной защиты. Выполнен анализ статистических данных функционирования релейной защиты фидеров контактной сети на примере Забайкальской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Представлены результаты расчета описательных статистик для частых видов отключений. Выявлены наиболее типичные виды срабатываний релейной защиты. Установлено распределение отключений фидеров контактной сети по причинам перегрузки по дистанциям электроснабжения. По результатам исследования сделаны выводы, что рассмотренные наиболее типичные виды срабатываний релейной защиты во многом обусловлены переходом на микропроцессорную базу для реализации терминалов направленной дистанционной защиты фидеров контактной сети. Алгоритмы, заложенные в основу релейной защиты, остались неизменными, а фундаментальным недостатком этих алгоритмов является невозможность полноценного разграничения нормального и аварийного режимов работы системы при движении поездов повышенной массы. Для вероятного решения указанных вопросов авторами предлагается внесение изменений в алгоритм работы резервной ступени направленной дистанционной защиты, данный алгоритм должен быть динамическим, изменяющимся по отношению к нагрузке.

Ключевые слова

тяговое электроснабжение, релейная защита, тяжеловесное движение, контактная сеть, Забайкальская железная дорога

Для цитирования

Роголёв А.В. Анализ статистики срабатывания защиты фидеров контактной сети на примере Забайкальской железной дороги / А.В. Роголёв, О.С. Соловьёва, А.Г. Емельянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 42–50. DOI 10.26731/1813-9108.2023.(77).42-50.

Информация о статье

поступила в редакцию: 20.03.2023 г.; поступила после рецензирования: 24.03.2023 г.; принята к публикации: 27.03.2023 г.

The statistics analyses of feeder protection actuation of the contact network on the example of the Trans-Baikal railway

A.V. Rogalev✉, O.S. Solov'eva, A.G. Emel'yanov

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

✉a_rogalev@inbox.ru

Abstract

The article considers the issue of improving the reliability of traction power supply systems from point of view of relay protection operation. The problems of JSC «Russian Railways» are pointed out faced by the company when creating a development strategy during the analysis of the current state of the infrastructure. Some issues and tasks of the holding's infrastructure development are considered, including the impact of high-mass trains while striving to reduce the inter-train interval, on reducing the reliability of the traction power supply system from the point of view of relay protection operation. The analysis of statistical data on the operation of feeders relay protection of the contact network is carried out on the example of the Trans-Baikal Railway – a branch of JSC «Russian Railways». The results of calculating descriptive statistics for frequent types of outages are presented. The most typical types of relay protection actuations have been identified. The distribution of the feeder disconnections of the contact network for overload reasons has been established over power supply distances. Conclusions are made that the most characteristic types considered of relay protection actuations are largely due to the transition to a microprocessor base for the implementation of terminals for directional remote protection of contact network feeders. The algorithms underlying the relay

protection have remained unchanged the fundamental disadvantage of these being the inability to fully differentiate between normal and emergency modes of operation of the system when trains of increased mass are moving. For the possible solution of these issues, the authors propose changes to the algorithm of the backup stage of directional remote protection, as the protection algorithm should be dynamic, changing with respect to the load.

Keywords

traction power supply, relay protection, heavy traffic, contact network, Trans-Baikal railway

For citation

Rogalev A.V., Solov'eva O.S., Emel'yanov A.G. Analiz statistiki sbratyvaniya zashchity fiderov kontaktnoi seti na primere Zabaikal'skoi zheleznoi dorogi [The statistics analyses of feeder protection actuation of the contact network on the example of the Trans-Baikal railway]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 42–50. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).42-50.

Article info

Received: March 20, 2023; Revised: March 24, 2023; Accepted: March 27, 2023.

Введение

Компания ОАО «РЖД» динамически развивается и имеет ряд стратегических целей. Анализ текущего состояния инфраструктуры, выполненный в блоке 5.3 [1], указывает на следующие ключевые проблемы, с которыми столкнулась компания на момент разработки стратегии:

1. Несоответствующий уровень пропускной способности на отдельных участках и направлениях спросу с позиции рынка перевозок, присутствие около 10,2 тыс. км «узких мест».

2. Значительный износ отдельных элементов железнодорожной инфраструктуры.

3. Недостаток возможностей для кратного роста надежности, скорости, точности и качества перевозок.

Также в блоке 5.3 обозначены ключевые задачи развития инфраструктуры холдинга:

1. Совершенствование железнодорожной инфраструктуры для перехода на движение поездов повышенной массы с весовыми нормами поездов 9 тыс. т и более.

2. Снижение издержек за счет повышения энергоэффективности и производительности труда, рационализации и оптимизации ремонтных и эксплуатационных работ.

3. Повышение уровня безопасности перевозок, а также снижение факторов риска, связанных с воздействием «человеческого фактора» на технологический процесс.

С момента начала реализации стратегии развития к 2022 г. ключевые задачи реализованы. Так, на Забайкальской железной дороге – филиале ОАО «РЖД» более семи лет обращаются сдвоенные поезда повышенной массы 12 600 т по режимным картам, что соответствует стратегическим задачам и целям, обозначенным в [1].

Актуальность проблемы и постановка задачи

Увеличение массы составов при одновременном стремлении к сокращению межпоездного интервала приводит к снижению надежности системы тягового электроснабжения (СТЭ) с точки зрения работы релейной защиты.

При организации движения поездов повышенной массы на регулярной основе наблюдается снижение напряжения в фидере контактной сети к граничным значениям минимально допустимого его уровня, что негативно сказывается на качестве электрической энергии и приводит к значительным искажениям формы сигнала тока и напряжения. Присутствует сильное «загрязнение» тяговой сети высшими гармоническими составляющими, что подтверждается высокими значениями коэффициентов гармонических искажений напряжения и тока [2–5].

Таким образом, указанные факты отрицательно сказываются на качестве и точности работы направленной дистанционной защиты фидеров контактной сети (НДЗ ФКС). При организации движения поездов повышенной массы наблюдается неоднозначность в оценке режима НДЗ ФКС и увеличение числа срабатываний защит по перегрузке и неизвестным причинам.

Целью проводимого исследования является определение возможного пути повышения надежности СТЭ с позиции работы релейной защиты посредством повышения точности работы НДЗ ФКС.

Основная часть

Снижение надежности СТЭ на полигоне Забайкальской железной дороги – филиале ОАО «РЖД» можно проиллюстрировать сум-

марной статистикой работы релейной защиты фидеров контактной сети за 2018–2019 гг., представленной на рис. 1.

Детализация отключений релейной защиты по видам срабатывания и статистика работы релейной защиты фидеров контактной сети по соответствующим годам представлена на рис. 2.

Анализ диаграмм на рис. 1 и 2 выявил, что значительное количество срабатываний защит наблюдается по следующим видам от-

ключений:

- неустановленные причины;
- неисправности электрооборудования электроподвижного состава (ЭПС);
- перегрузка.

Результаты расчета описательных статистик для частых видов отключений за 2018–2019 гг. в целом для Забайкальской железной дороги представлены в таблице.

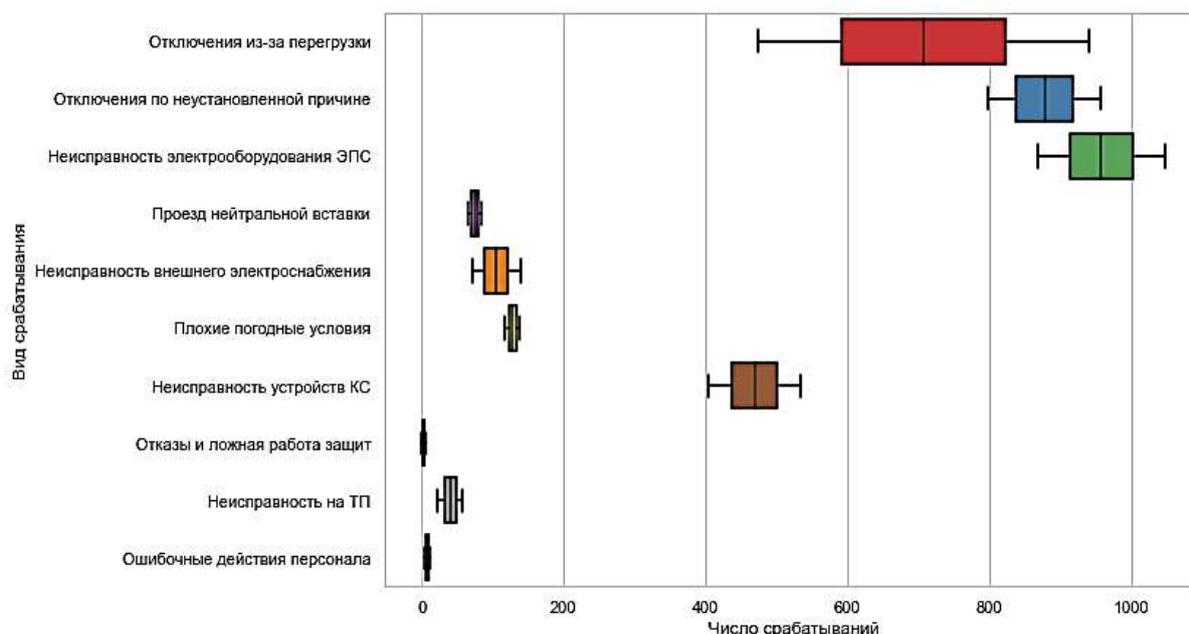
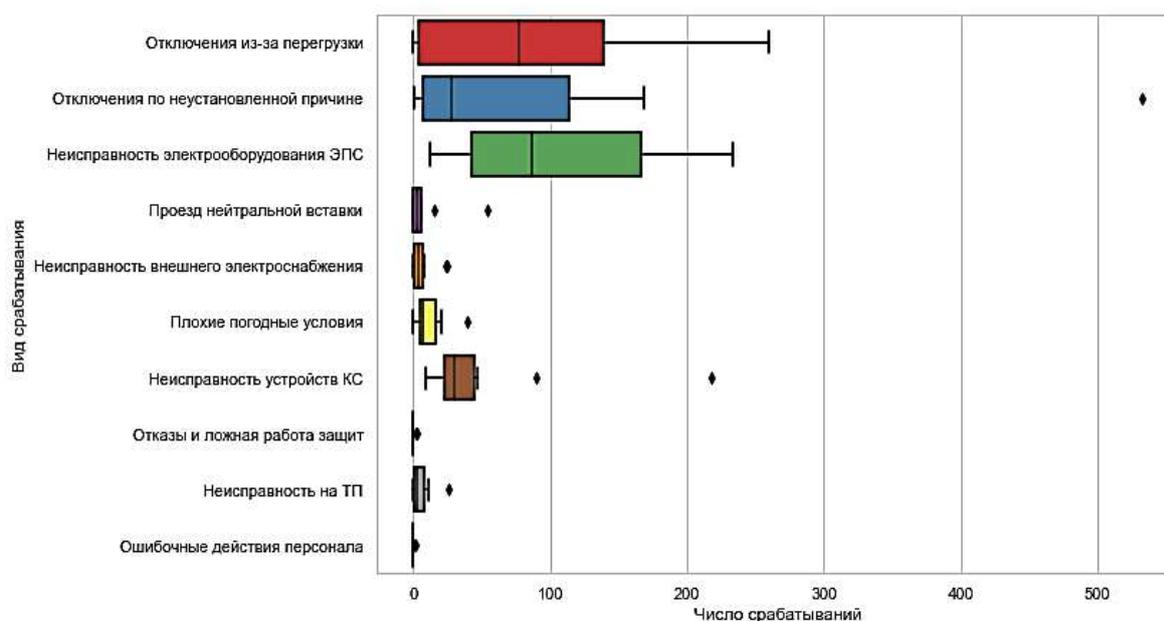
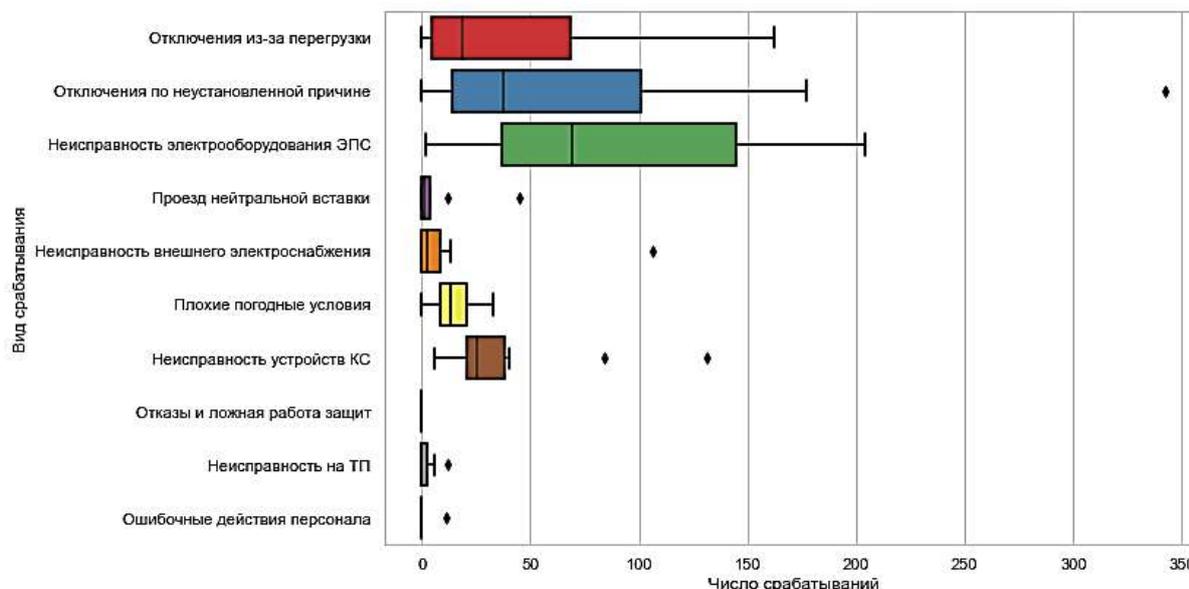


Рис. 1. Суммарная статистика срабатываний релейной защиты фидеров контактной сети за 2018–2019 гг.
Fig. 1. Summary statistics of actuations of catenary feeders relay protection for 2018–2019



a



б

Рис. 2. Статистика срабатываний релейной защиты фидеров контактной сети на Забайкальской железной дороге: а – 2018 г.; б – 2019 г.

Fig. 2. Actuation statistics of relay protection of the contact network feeders at Trans-Baikal railway: а – 2018; б – 2019

Меры центральной тенденции для наиболее частых видов отключений за 2018–2019 гг.
Central trend measures for the most frequent shutdown types for 2018–2019

Меры центральной Тенденции Central trend measures	Перегрузка Overload		Отключения по неустановленной причине Shutdowns for unknown reason		Неисправность электрооборудования электроподвижного состава Malfunction of electrical equipment of electric rolling stock	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Среднее значение Average value	94,00	47,50	95,8	79,8	104,7	86,8
Стандартное отклонение Standard deviation	101,24	60,11	163,97	107,67	78,48	72,26
Минимальное значение Minimum value	0	0	1	0	12	2
25 %	4	4,5	6,5	14,25	42,75	37
50 %	77,5	19	27,5	37,5	87	69
75 %	139,25	68,5	113,5	101	166,75	144,5
Максимальное значение Maximum value	260	162	532	342	234	204

Анализ наиболее частых видов отключений показывает, что за 2019 г. по обозначенным показателям наблюдается снижение общего количества отключений по сравнению с 2018 г., однако их количество остается значимым, так как факт каждого отключения несет в себе риск для надежности и бесперебойности перевозоч-

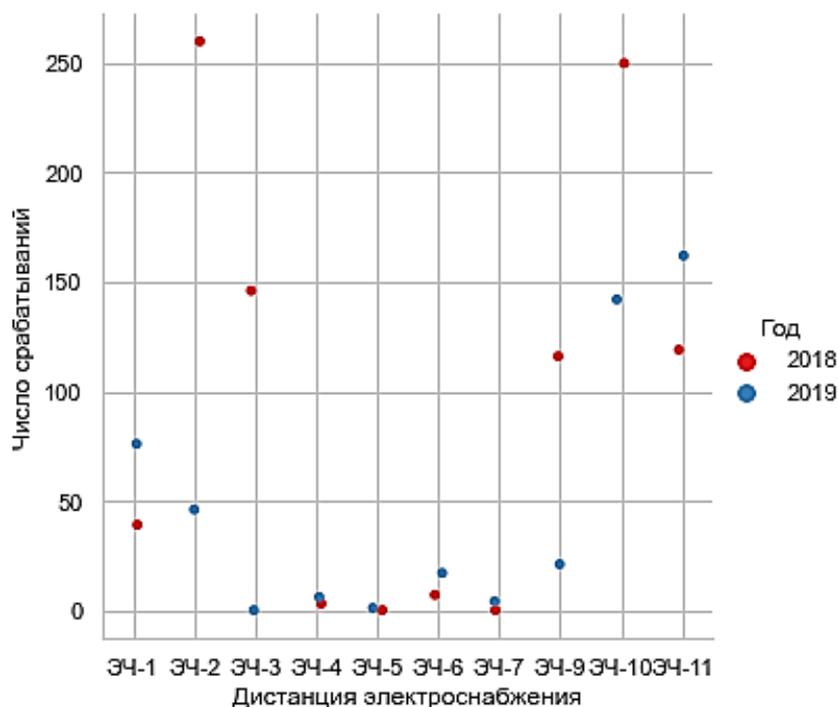
ного процесса.

Для ряда тяговых подстанций ситуация имеет более критичный характер, что доказывает значительная величина стандартного отклонения и сильный разброс значений отключений относительно среднего значения, а также наличие выбросов, указанных в виде отдельных

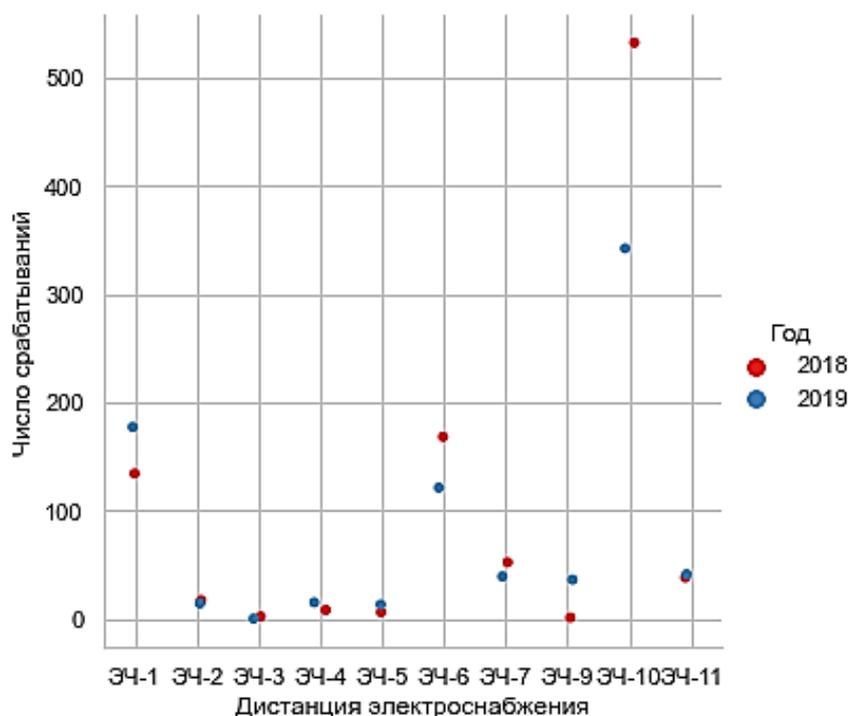
точек на рис. 2.

В качестве доказательства данного утверждения на рис. 3 приведены диаграммы рассеяния по количеству срабатываний на каждой дистанции электроснабжения (ЭЧ) для отклю-

ний по причине перегрузки, отключений по неустановленной причине и отключений по причине неисправности электрооборудования ЭПС.



а



б

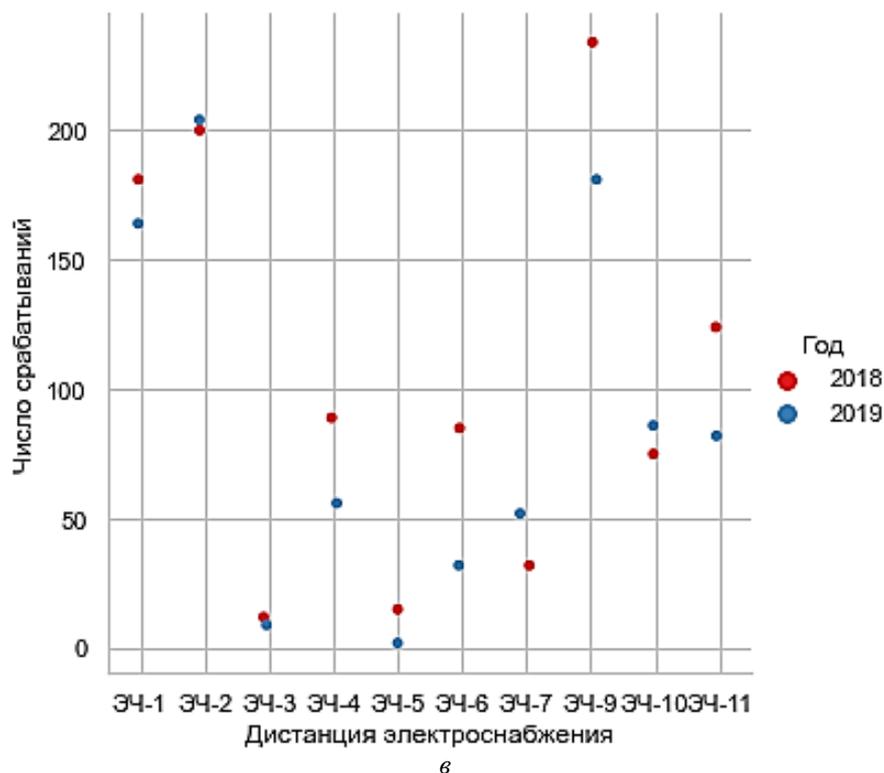


Рис. 3. Распределение отключений по дистанциям электроснабжения в 2018 и 2019 гг.: *a* – перегрузка; *b* – неустановленная причина; *c* – неисправности электрооборудования электроподвижного состава

Fig. 3. Distribution of shutdowns over power supply distances in 2018 and 2019: *a* – overload; *b* – unidentified reason; *c* – malfunctions of rolling stock electrical equipment

Анализ распределения отключений из-за перегрузки по дистанциям электроснабжения показывает, что близкое к критическому значению числа срабатываний релейной защиты для ЭЧ-3, ЭЧ-11, где количество срабатываний в год превышает 100. Для ЭЧ-10 количество срабатываний релейной защиты равно 250.

Следует отметить, что для ряда дистанций электроснабжения наблюдается улучшение ситуации по отношению к предыдущему году. Например, для ЭЧ-2 и ЭЧ-9. Это может быть связано с плановой модернизацией комплектов защит и выводом из работы третьей ступени дистанционной защиты для целенаправленного уменьшения числа ложных отключений.

Анализ отключений по неустановленной причине по дистанциям электроснабжения показывает, что большое число данного вида отключений наблюдается на ЭЧ-1, ЭЧ-6 и ЭЧ-10. Подобное распределение отключений может быть вызвано системными ошибками в оценке причины отключений персоналом дистанции.

Анализ отключений из-за неисправности

электрооборудования ЭПС по дистанциям электроснабжения показывает, что большое количество данного вида отключений наблюдается на ЭЧ-1, ЭЧ-2 и ЭЧ-9, значимое количество отключений на ЭЧ-4, ЭЧ-7, ЭЧ-10 и ЭЧ-11. Подобное распределение отключений может быть вызвано сложным профилем пути указанных дистанций и проблемами с подвижным составом, оборачивающимся на данных дистанциях.

Заключение

Рассмотренная ситуация с позиции работы релейной защиты во многом обусловлена переходом на микропроцессорную базу для реализации терминалов направленной дистанционной защиты ФКС. Алгоритмы, заложенные в основу релейной защиты, остались неизменными. Фундаментальный недостаток данных алгоритмов – затруднительность разделения штатного и аварийного режимов работы системы при движении поездов повышенной массы [6–15].

На момент разработки и внедрения дан-

ных алгоритмов они показывали значительное повышение надежности систем тягового электроснабжения при нормативах весов и интервалах обычного грузового движения. Однако в современных условиях они не обеспечивают должного уровня надежности, что подтверждается статистикой отключений.

Современная микропроцессорная элементная база позволяет использовать широкий спектр возможностей в применении новых подходов к разработке алгоритмов дистанционных защит. С одной стороны, можно продолжать построение алгоритмов классическим подходом, когда задается определенный набор правил для алгоритма с целью получения желаемого результата, с другой, использовать статистический подход, основанный на широкой базе статистики работы релейной защиты и статистики процессов, протекающих в системах тягового электроснабжения [16–22].

Для возможного решения указанных во-

просов авторами предлагается внести изменения в алгоритм работы резервной ступени направленной дистанционной защиты [23–25]. По мнению авторов, алгоритм работы защиты должен быть динамическим, изменяющимся по отношению к нагрузке. Учет сопротивления нагрузки позволит исключить ложное срабатывание резервной ступени защиты в нормальном режиме и, возможно, повысит ее чувствительность при токах нагрузки меньше токов короткого замыкания. При аварийных режимах защита может возвращаться к обычной характеристике, используя данные гармонического спектра и скорость изменения напряжения. Использование статистических данных для определения оптимального алгоритма разграничения режимов функционирования системы тягового электроснабжения и статистический подход – предмет дальнейших изысканий и исследований.

Список литературы

1. Стратегия развития Холдинга «РЖД» на период до 2030 года // ОАО «РЖД»: сайт. URL : <https://volgograd-terkom34.ru/wp-content/uploads/2017/05/Стратегия-развития-ОАО-РЖД-до-2030-года.pdf> (Дата обращения 10.02.2023).
2. Трифонов Р.С., Роголёв А.В., Соловьёва О.А. Исследование распределения параметров системы тягового электроснабжения, контролируемых релейной защитой фидеров контактной сети на примере тяговой подстанции «Сохондо» Забайкальской железной дороги // Наука и техника транспорта. 2022. № 4. С 68–75.
3. О мерах по совершенствованию технической политики в области защиты электроустановок от коротких замыканий и перегрузки : распоряжение ОАО «РЖД» от 15.01.2020 №37/р (ред. 21.02.2022). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
4. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. М. : Стандартформ, 2014. 18 с.
5. О мерах по совершенствованию технической политики в области эксплуатации и проектирования защиты системы тягового электроснабжения переменного тока от коротких замыканий и перегрузок : распоряжение ОАО «РЖД» от 7.04.2016 № 615р. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
6. Фигурнов Е.П. Релейная защита. Ч. 1. Основы релейной защиты. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2009. 415 с.
7. Пинчуков П.С., Макашева С.И., Костин А.П. Комплексная оценка работы релейной защиты тяговой сети переменного тока // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. 2020. № 7 (92). С. 27–38.
8. Агафонов А.И., Бростилова Т.Ю., Джазовский Н.Б. Современная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. М. : Вологда : Инфа-Инженерия, 2020. 300 с.
9. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. М. : Высш. шк., 1991. 496 с.
10. Тельманова Е.Д. Электрические и электронные аппараты. Екатеринбург : РГПУ, 2010. 131 с.
11. Евминов Л.И., Селиверстов Г.И. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. Гомель : ГГТУ, 2016. 531 с.
12. Релейная защита и автоматика в электрических сетях / под ред. Дрозда В.В. М. : Альвис, 2012. 639 с.
13. Пинчуков П.С. Защита секционированных тяговых сетей переменного тока. Хабаровск : ДВГУПС, 2010. 95 с.
14. Гловацкий В.Г., Пономарев И.В. Современные средства релейной защиты и автоматики электросетей. М. : Энергомашвин, 2006. 612 с.
15. Инструкция по оперативному обслуживанию устройств РЗА АЗм на ЗабЖД. Чита : ЗабНТЭ, 2020. 12 с.
16. Дьяков А.Ф., Овчаренко И.И. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. М. : МЭИ, 2000. 199 с.
17. Захаров О.Г. Аппаратная надежность устройств релейной защиты // Библиотечка электротехника. 2016. № 7 (217). С. 1–88.
18. Цифровые технологии в релейной защите и автоматизации / сб. ст. Вып. I. Чебоксары : СРЗАУ, 2018. 71 с.
19. К вопросу о проектировании и эксплуатации микропроцессорных устройств релейной защиты / А.В. Сычев, Л.И. Евминов, В.В. Курганов и др. // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. 2009. № 4 (39). С. 73–79.
20. Герман Л.А., Новиков Е.В. Совершенствование работы интеллектуальных терминалов для автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока // Наука и техника транспорта. 2015. № 4. С. 16–21.

21. Интеллектуальные терминалы для автоматизации электроснабжения / Л.А. Герман, А.В. Саморуков, Д.В. Ишкин и др. // Локомотив. 2013. № 12 (684). С. 39–40.
22. Повышение селективности работы микропроцессорной релейной защиты фидеров контактной сети железных дорог переменного тока / М.В. Востриков, А.В. Данеев, К.В. Менакер и др. // Изв. Тул. гос. ун-та. Технические науки. 2022. № 5. С. 358–372.
23. Пат. 201026 Рос. Федерация. Устройство третьей ступени дистанционной защиты фидеров контактной сети / Р.С. Трифонов, С.А. Филиппов, Д.А. Яковлев и др. № 2020111263 ; заявл. 05.06.2020 ; опубл. 24.11.2020, Бюл. № 33. 5 с.
24. Филиппов С.А., Яковлев Д.А., Трифонов Р.С. Разработка способа идентификации режима работы системы тягового электроснабжения третьей ступенью дистанционной защиты фидеров контактной сети при пропуске поездов повышенной массы // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2015. № 2 (58). С. 132–140.
25. Филиппов С.А., Трифонов Р.С., Соловьёва О.А. Факторный анализ работы дистанционной защиты фидеров контактной сети в условиях организации тяжеловесного движения // Транспорт Урала. 2020. № 1 (64). С. 94–99.

References

1. Strategiya razvitiya Kholdinga «RZHD» na period do 2030 goda (Elektronnyi resurs) [Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030 (Electronic resource)]. Available at: <https://volgograd-terkom34.ru/wp-content/uploads/2017/05/Стратегия-развития-ОАО-РЖД-до-2030-года.pdf> (Accessed February 10, 2023).
2. Trifonov R.S., Rogalev A.V., Solov'eva O.A. Issledovanie raspredeleniya parametrov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya, kontroliruemykh releinoi zashchitoy fiderov kontaktnoi seti na primere tyagovoi podstantsii «Sokhondo» Zabaikal'skoi zheleznoi dorogi [Investigation of the distribution of parameters of the traction power supply system controlled by relay protection of contact network feeders on the example of the Sokhondo traction substation of the Trans-Baikal Railway]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport], 2022, no. 4, pp. 68–75.
3. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» ot 15.01.2020 №37/r (red. 21.02.2022) «O merakh po sovershenstvovaniyu tekhnicheskoi politiki v oblasti zashchity elektroustanovok ot korotkikh замыканий i peregruzki» [Order of JSC «Russian Railways» dated January 15, 2020, No 37/r (ed. February 21, 2022) «On measures to improve the technical policy in the field of protection of electrical installations from short circuits and overloading»].
4. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [State Standard 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 18 p.
5. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» ot 7.04.2016 № 615r «O merakh po sovershenstvovaniyu tekhnicheskoi politiki v oblasti ekspluatatsii i proektirovaniya zashchity sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka ot korotkikh замыканий i peregruzok» [Order of JSC «Russian Railways» dated April 7, 2016 No 615r « On measures to improve the technical policy in the field of operation and design of protection of the AC traction power supply system from short circuits and overloads»].
6. Figurinov E.P. Releynaya zashchita (v 2 ch). Ch. 1. Osnovy releinoi zashchity [Relay protection (in 2 parts). Part 1. Fundamentals of relay protection]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2009. 415 p.
7. Pinchukov P.S., Makasheva S.I., Kostin A.P. Kompleksnaya otsenka raboty releinoi zashchity tyagovoi seti peremennogo toka [Comprehensive assessment of the operation of relay protection of the AC traction network]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2020, no. 7 (92), pp. 27–38.
8. Agafonov A.I., Brostilova T.Yu., Dzhazovskii N.B. Sovremennaya releynaya zashchita i avtomatika elektroenergeticheskikh sistem [Modern relay protection and automation of electric power systems]. Moscow: Vologda: Infa-Inzheneriya Publ., 2020. 300 p.
9. Andreev V.A. Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya [Relay protection and automation of power supply systems]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1991. 496 p.
10. Tel'manova E.D. Elektricheskie i elektronnye apparaty [Electrical and electronic devices]. Ekaterinburg: RGPPU Publ., 2010. 131 p.
11. Evminov L.I., Seliverstov G.I. Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya [Relay protection and automation of power supply systems]. Gomel': GGTU Publ., 2016. 531 p.
12. Releynaya zashchita i avtomatika v elektricheskikh setyakh (pod red. Drozda V.V.) [Relay protection and automation in electrical networks (ed. Drozd V.V.)]. Moscow: Al'vis Publ., 2012. 639 p.
13. Pinchukov P.S. Zashchita sektionirovannykh tyagovykh setei peremennogo toka [Protection of partitioned traction AC networks]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2010. 95 p.
14. Glovatskii V.G., Ponomarev I.V. Sovremennye sredstva releinoi zashchity i avtomatiki elektrosetei [Modern means of relay protection and automation of power grids]. Moscow: Energomashvin Publ., 2006. 612 p.
15. Instruktsiya po operativnomu obsluzhivaniyu ustroystv RZA AZm na ZabZhD [Instructions for operational maintenance of relay protection and automation devices of AZM on the Trans-Baikal Railway]. Chita: ZabNTE Publ., 2020. 12 p.
16. D'yakov A.F., Ovcharenko I.I. Mikroprotsessornaya releynaya zashchita i avtomatika elektroenergeticheskikh sistem [Microprocessor relay protection and automation of electric power systems]. Moscow: MEI Publ., 2000. 199 p.
17. Zakharov O.G. Apparatsnaya nadezhnost' ustroystv releinoi zashchity [Hardware reliability of relay protection devices]. *Bibliotekha elektrotekhnika* [Library of Electrical Engineering], 2016, no. 7 (217), pp. 1–88.
18. Tsifrovyye tekhnologii v releinoi zashchite i avtomatizatsii [Digital technologies in relay protection and automation]. *Sbornik statei* [Proceedings], Issue no 1. Cheboksary: SRZAU Publ., 2018. 71 p.

19. Sychev A.V., Evminov L.I., Kurganov V.V., Guminskii A.N. K voprosu o proektirovanii i ekspluatatsii mikroprotsessornykh ustroystv releinoi zashchity [On the issue of designing and operating microprocessor relay protection devices]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo* [Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi], 2009, no. 4 (39), pp. 73–79.

20. German L.A., Novikov E.V. Sovershenstvovanie raboty intellektual'nykh terminalov dlya avtomatizatsii elektrosnabzheniya tyagovoi seti peremennogo toka [Improving the operation of intelligent terminals for automation of AC traction power supply]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport], 2015, no. 4, pp. 16–21.

21. German L.A., Samorukov A.V., Ishkin D.V., Yakunin D.V. Intellektual'nye terminaly dlya avtomatizatsii elektrosnabzheniya [Intelligent terminals for power supply automation]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2013, no. 12 (684), pp. 39–40.

22. Vostrikov M.V., Daneev A.V., Menaker K.V., Szykh V.N. Povyshenie selektivnosti raboty mikroprotsessornoi releinoi zashchity fiderov kontaktnoi seti zheleznykh dorog peremennogo toka [Increasing the selectivity of the microprocessor relay protection of feeders of the contact network of AC railways]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletins of the Tula State University. Technical sciences], 2022, no. 5, pp. 358–372.

23. Trifonov R.S., Filippov S.A., Yakovlev D.A., Solov'eva O.A. Patent RU 201026 U1, 24.11.2020.

24. Filippov S.A., Yakovlev D.A., Trifonov R.S. Razrabotka sposoba identifikatsii rezhima raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya tret'ei stupen'yu distantsionnoi zashchity fiderov kontaktnoi seti pri propuske poezdov povyshennoi massy [Development of a method for identifying the operating mode of the traction electric supply system with the third stage of remote protection of contact network feeders when passing trains of increased mass]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2015, no. 2 (58), pp. 132–140.

25. Filippov S.A., Trifonov R.S., Solov'eva O.A. Faktorny analiz raboty distantsionnoi zashchity fiderov kontaktnoi seti v usloviyakh organizatsii tyazhelovesnogo dvizheniya [Factor analysis of the operation of remote protection of contact network feeders in the conditions of heavy traffic organization]. *Transport Urala* [Transport of Urals], 2020, no. 1 (64), pp. 94–99.

Информация об авторах

Роголёв Андрей Владимирович, кандидат педагогических наук, доцент кафедры электроснабжения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; e-mail: a_rogalev@inbox.ru.

Соловьёва Оксана Александровна, старший преподаватель кафедры электроснабжения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; e-mail: ksusha_s777@mail.ru.

Емельянов Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; e-mail: aleksandr-emelja@mail.ru.

Information about the authors

Andrei V. Rogalev, Ph.D. in Pedagogical Science, Associate Professor of the Department of Power Supply, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: a_rogalev@inbox.ru.

Oksana A. Solov'eva, Assistant Professor of the Department of Power Supply, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: ksusha_s777@mail.ru.

Alexander G. Emel'yanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Power Supply, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: aleksandr-emelja@mail.ru.

Исследования возможности снижения степени износа гребня колеса в грузовом вагоне

Ю.И. Матяш, А.Д. Родченко✉, А.Г. Петракова

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

✉Rodchenko_57@mail.ru

Резюме

Наблюдаемый рост экспорта угля в азиатские страны (Япония, Китай и Индия) потребовал не только увеличения добычи угля по Кузбасскому региону до 16 млн т в год, но и обеспечения его вывоза по направлению Кузбасс – Восток, которое характеризуется большим количеством кривых малого и среднего радиуса. Поэтому был изучен механизм взаимодействия элементов грузового вагона в процессе прохождения вагона в кривой малого радиуса. Установлено, что при движении тележки грузового вагона в кривой малого радиуса возникает необходимость в его повороте с целью отслеживания изменяющегося плана рельсового пути. Однако свободному перемещению тележки грузового вагона препятствует сила трения, возникающая в узле «пятник – подпятник». Показано, что при нормируемых параметрах обточка обода колеса и интенсивности износа гребней колес инновационных вагонов, эксплуатационный пробег колеса может достигать не более 650 тыс. км с последующим демонтажем колеса с колесной пары и его утилизации. Однако в этом случае возникает необходимость демонтировать и кассетный подшипник, который имеет значительный запас по эксплуатационному пробегу (более 35 %). На основании исследований было установлено, что для обеспечения равного эксплуатационного срока службы колеса и кассетного подшипника необходимо снижать коэффициент трения в узлах «пятник – подпятник» грузового вагона (до $f = 0,05$). С этой целью было предложено использовать в узлах трения «пятник – подпятник» самосмазываемые композиционные материалы, включающие многостенные углеродные нанотрубки, обеспечивающие многократное (до 8 раз) снижение коэффициента трения. Это будет способствовать выравниванию эксплуатационного пробега колеса и кассетного буксового узла. Предложенные технические решения позволяют значительно уменьшить число обточек колесных пар и исключить повторное использование кассетных подшипников.

Ключевые слова

грузовой вагон, колесная пара, узел «пятник – подпятник», коэффициент трения, кассетный подшипник, углеродные нанотрубки, буксовый узел

Для цитирования

Матяш Ю.И. Исследования возможности снижения степени износа гребня колеса в грузовом вагоне / Ю.И. Матяш, А.Д. Родченко, А.Г. Петракова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 51–59. DOI 10.26731/1813-9108.2023.(77).51-59.

Информация о статье

поступила в редакцию: 31.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 16.03.2023 г.; принята к публикации: 17.03.2023 г.

Research of the possibility of reducing wear degree of the wheel edge in a freight wagon

Yu.I. Matyash, A.D. Rodchenko✉, A.G. Petrakova

Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

✉Rodchenko_57@mail.ru

Abstract

The observed growth in coal exports to Asian countries (Japan, China and India) required not only to increase coal production in the Kuzbass region up to 16 million tons per year, but also to ensure its export in the Kuzbass – East direction, which is characterized by a large number of curves of small and medium radius. Therefore, the mechanism of interaction between the elements of a freight wagon was studied in the process of the wagon passing through a small radius curve. It has been established that when a freight wagon bogie moves in a small radius curve, it becomes necessary to turn it in order to trace the changing track plan. However, the free movement of the freight wagon bogie is hindered by the friction force that occurs in the node (center plate – thrust bearing). It is shown that with the normalized parameters of turning the wheel rim and the intensity of wear of the wheel flanges of innovative wagons, the operational mileage of the wheel can reach no more than 650 thousand km, with the subsequent dismantling of the wheel from the wheelset and its disposal. However, in this case, it becomes necessary to dismantle the cassette bearing, which has a significant reserve in terms of operating mileage (more than 35 %). Based on the research, it was found that in order to ensure an equal operational life of the wheel and the cassette bearing, it is necessary to reduce the friction coefficient in the node “center plate - thrust bearing” of the freight wagon (up to $f = 0,05$). For this purpose, it was pro-

posed to use self-lubricating composite materials in friction units (center plate - thrust bearing), including multi-walled carbon nanotubes, which provide a multiple (up to 8 times) reduction in the friction coefficient, thereby ensuring alignment of the operating mileage of the wheel and the cassette axlebox assembly. The proposed technical solutions can significantly reduce the number of wheel set grinding and eliminate the reuse of cassette bearings.

Keywords

freight wagon, wheelset, assembly «center plate – thrust bearing», coefficient of friction, cassette bearing, carbon nanotubes, axle box assembly

For citation

Matyash Yu.I., Rodchenko A.D., Petrakova A.G. Issledovaniya vozmozhnosti snizheniya stepeni iznosa grebnya koleasa v gruzovom vagone [Research of the possibility of reducing wear degree of the wheel edge in a freight wagon]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 51–59. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).51-59.

Article Info

Received: October 31, 2022; Revised: March 16, 2023; Accepted: March 17, 2023.

Введение

Учитывая интенсивное развитие мощностей на подходах к портам Хабаровского края, а также активное обновление железнодорожной отрасли инновационными грузовыми вагонами, оснащенными кассетными подшипниками, появилась возможность в значительной степени увеличить объемы отправки угля из Кузбасса на ст. «Находка – Восточная» Дальневосточной железной дороги [1]. Сдерживающим фактором реализации этого процесса является несогласованность эксплуатационных ресурсов колеса и кассетных подшипников [2–4]. Это объясняется тем, что при выработке эксплуатационного ресурса колеса производят демонтаж и утилизацию отработанного колеса. При этом возникают проблемы с дальнейшим использованием кассетных подшипников, у которых эксплуатационный ресурс выработан не более чем на 35 %. Поэтому у владельцев вагонов появляется желание повторного их использования в рамках «давальческой схемы», которая во многих случаях является причиной схода грузового подвижного состава [5].

В предлагаемой работе проанализированы особенности влияния плана железной дороги, расположенной между Кузбассом и ст. «Находка – Восточная», на интенсивность износа гребня колеса грузового вагона.

Для оценки интенсивности износа гребня колеса грузового вагона был сформирован поезд, который состоял из полувагонов стандартных и инновационных моделей (рис.1). Длина экспериментального участка составляла 5 333 км. Исходное значение геометрии гребней колес обеспечивали при проведении депоовского ремонта, которое составляло в среднем

30–33 мм, а перевод их в неисправное состояние проводился при достижении среднего значения – 27,5 мм. Оценку интенсивности износа гребней колес производили комплексами Конструкторско-технологического института научного приборостроения (КТИ НП) СО РАН. Данные, по которым оценивалась степень износа гребня колеса, приведены в табл. 1 [6].

Таблица 1. Значения показателей степени износа колесной пары
Table 1. Values of indicators of the degree of wear of the wheel set

Показатель Indicator	Величина Value
Средняя толщина гребня колеса при выходе из депоовского ремонта, мм The average thickness of the wheel flange after the depot repair, mm	31,5
Средняя толщина гребня колеса при переводе в неисправное состояние, мм The average thickness of the wheel flange when transferred to a faulty state, mm	27,5
Пробег в груженном состоянии, км Mileage laden, km	5 333
Износ гребня на 10 тыс. км, мм Flange wear per 10 thousand km, mm	0,75

Определение степени износа гребня колеса производилось по формуле:

$$K_{\text{изн.ср.}} = \frac{\text{Износ}}{\text{Расстояние}} * 10\,000 \text{ км} = \\ = \frac{0,4}{5\,333} * 10\,000 \text{ км} = 0,75 \text{ мм.}$$

Из представленных экспериментальных

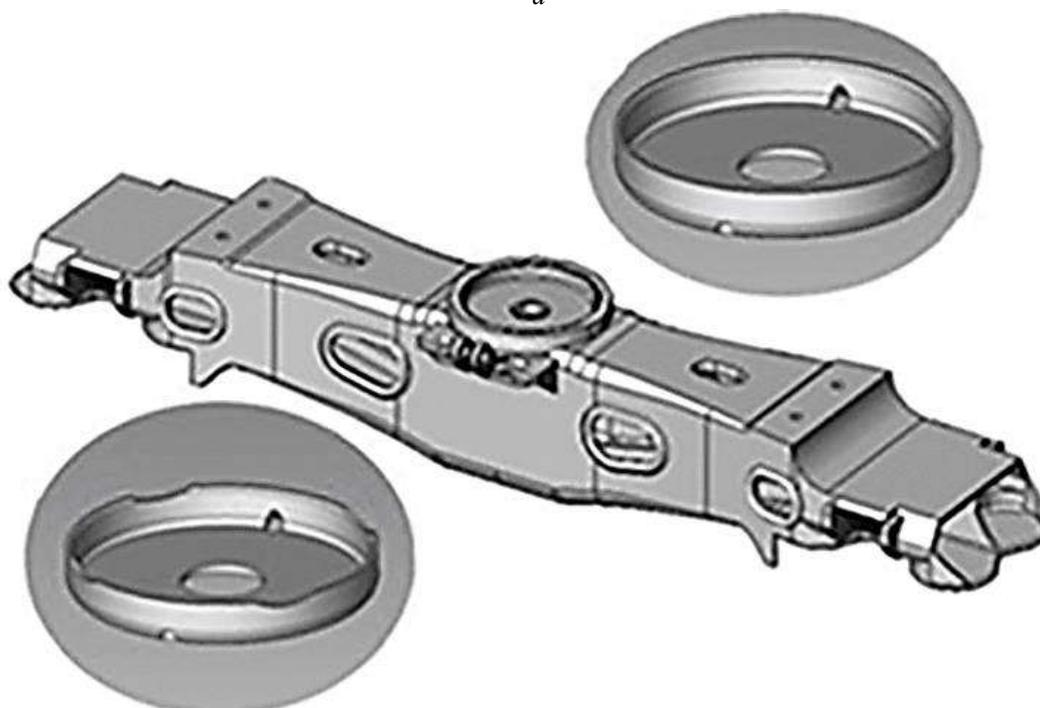
данных [6, 7] следует, что для инновационных вагонов износ гребня после прохождения 10 тыс. км составляет 0,75 мм.

При сравнении столь значительной разницы износа гребней колес для стандартных и

инновационных вагонов, было установлено, что износ гребней колес стандартных вагонов в 1,55 раз больше чем у инновационных. При отношениях коэффициентов трения прирост силы P8 составит $0,15/0,12 = 1,25$. [7–10].



a



b

Рис. 1. Общий вид узлов «пятник – подпятник» для стандартных (*a*) и инновационных вагонов (*b*)
Fig. 1. General view of the nodes «center plate – thrust bearing» for standard (*a*) and innovative wagons (*b*)

На основании этого было высказано предположение о существенном влиянии на степень износа гребня колеса силы трения ($f_{тр}$), возникающей в узле «пятник – подпятник», приводящей к возникновению момента трения (M) при движении вагона, препятствующего свободному перемещению тележки грузового вагона для отслеживания изменения плана железнодорожного пути. Поэтому были проанализи-

зированы особенности поведения элементов грузового вагона в процессе его прохождения в кривой малого радиуса. С этой целью на рис. 2, *а* приведена схема распределения силовых нагрузок от кузова вагона, а на рис 2, *б* – схема взаимодействия сил, возникающих в элементах грузового вагона в процессе его прохождения в кривой малого радиуса.

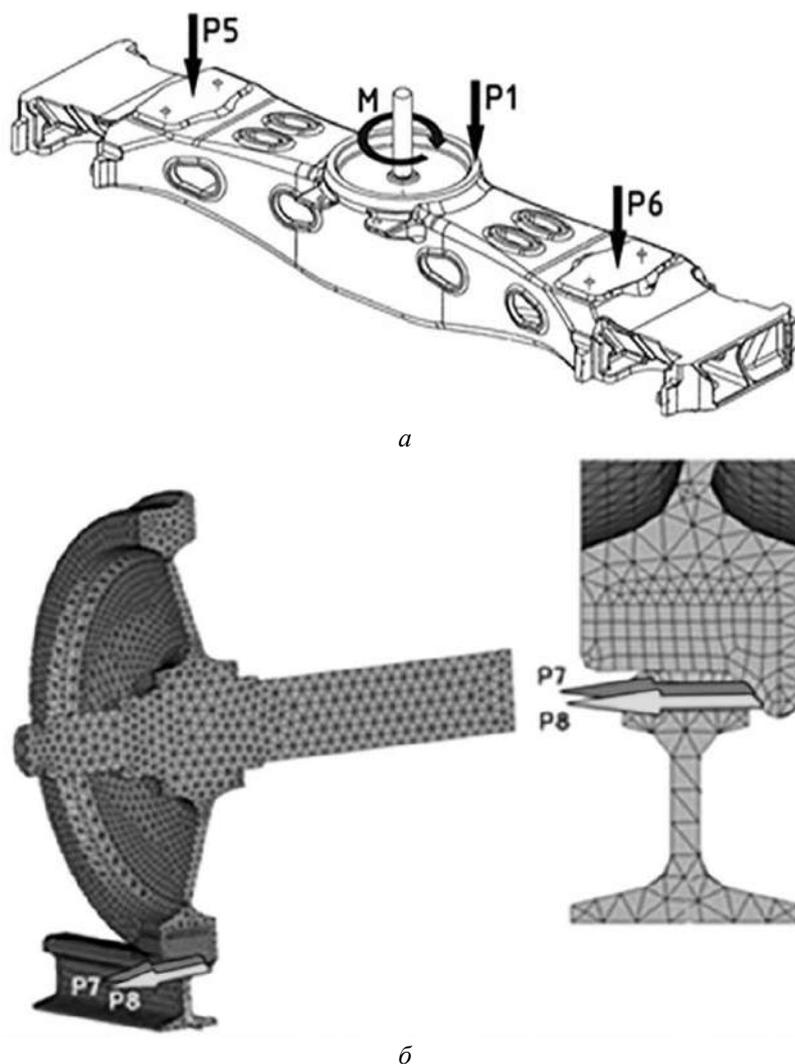


Рис. 2. Схема распределения силовых нагрузок от кузова вагона:

а – P1, P5 и P6 – общая нагрузка от кузова вагона и ее распределение между левой и правой тележками, *M* – момент трения, возникающий при движении вагона; *б* – взаимодействие сил, возникающих в элементах грузового вагона в процессе его прохождения в кривой малого радиуса (P7 – центробежная сила, P8 – сила нормального давления груженого грузового вагона)

Fig. 2. Scheme of power loads distribution from the wagon body:

a – P1, P5 and P6 – the total load of the wagon body, and its distribution between the left and right bogies, *M* – the friction moment that occurs when the wagon moves; *b* – interaction of forces arising in the elements of a freight wagon in the process of its passage in a curve of small radius (P7 – centrifugal force, P8 – normal pressure force of a loaded freight wagon)

Видно, что в процессе движения тележки грузового вагона в кривой малого радиуса возникает необходимость в ее повороте с целью отслеживания изменяющегося плана рельсового пути. Поскольку кузов грузового вагона закреплен на тележке посредством узла «пятника – подпятника», а последний подпятник располагается на надрессорной балке, входящей в состав грузовой тележки (см. рис. 2, а). Однако свободному перемещению тележки в кривой малого радиуса препятствует сила трения $F_{тр}$, возникающая в узле «пятник – подпятник», и момент трения M , возникающий при движении вагона. (см. рис. 2, б).

Далее были определены значения сил P7 и P8, приходящихся на каждую загруженную тележку инновационных вагонов и вызывающие износ гребня 0,75 мм на протяжении 10 тыс. км (см. табл. 1). При этом показано, что с учетом нормируемых параметров проводимой обточки обода колеса и интенсивности износа гребней колес эксплуатационный пробег колеса может достигать 650 тыс. км с последующим демонтажем колеса с колесной пары и его утилизации [11, 12].

Однако следует иметь в виду, что при демонтаже колесной пары возникает необходимость демонтировать не только колесо, но и кассетный подшипник, который имеет значительный запас по эксплуатационному пробегу (более 35 %). Несоответствие значений эксплуатационного пробега кассетно-буксового узла и колеса приводит к такой проблеме, как дальнейшее использование демонтируемого кассетного буксового узла. Соответствие геометрических и поверхностных параметров демонтированных элементов кассетных подшипников (включая ролики) может проводиться с использованием машинного метода (*роботрона*) [5].

Однако при этом отсутствуют достоверные сведения о степени развития дефектов усталостного происхождения. Известно, что при усталостном происхождении дефектов изменяется кристаллическая структура изделий, изготовленных из металла. Появляются микротрещины и происходит скачкообразное нарушение работоспособности изделий (например, изломы боковой рамы тележки грузового вагона или излом шейки оси колесной пары и др.) [12, 13].

Динамика таких крушений, произошедших в течение последних лет, приведена в табл. 2.

Таблица 2. Динамика крушений грузовых поездов

Table 2. Dynamics of freight train derailments

Год возникших происшествий Year of accident	Количество крушений грузовых поездов Number of freight train accidents
2012	17
2013	26
2014	38
2015	39
2016	43
2017	58
2018	63

Анализируя приведенные сведения о крушениях грузовых поездов, можно сказать, что они происходят по причине возникновения дефектов усталостного происхождения в деталях, полученных по «давальческой» схеме передачи деталей вагонов, бывших в употреблении (рис. 3), поэтому на сети ОАО «РЖД» повторное использование элементов кассетных подшипников запрещено.

В связи с этим рациональным выходом из сложившейся ситуации является выравнивание эксплуатационных пробегов колеса и кассетных подшипников путем совершенствования системы работы узла «пятник – подпятник».

На основании обработки экспериментальных данных, полученных в работе [6], показано, что для достижения эксплуатационного пробега колеса грузового вагона, сопоставимого с эксплуатационным пробегом кассетного подшипника (на уровне 1,5 млн км.), необходимо обеспечить коэффициент трения в узле «пятник – подпятник» грузового вагона $f = 0,04$, соблюдая при этом нормируемые параметры обточки обода колеса.

На основе исследования научнотехнической литературы установлено, что наиболее эффективным методом снижения коэффициента трения является использование в узлах трения так называемых самосмазываемых композиционных материалов, включающих неметаллический материал и композицию, поглощающую механическую энергию.

Наибольший интерес представляют многослойные углеродные нанотрубки [11].

Использование полимерных композиционных материалов с наноразмерными наполнителями из углеродных волокон, графита и т. д. позволяет получить композиционные

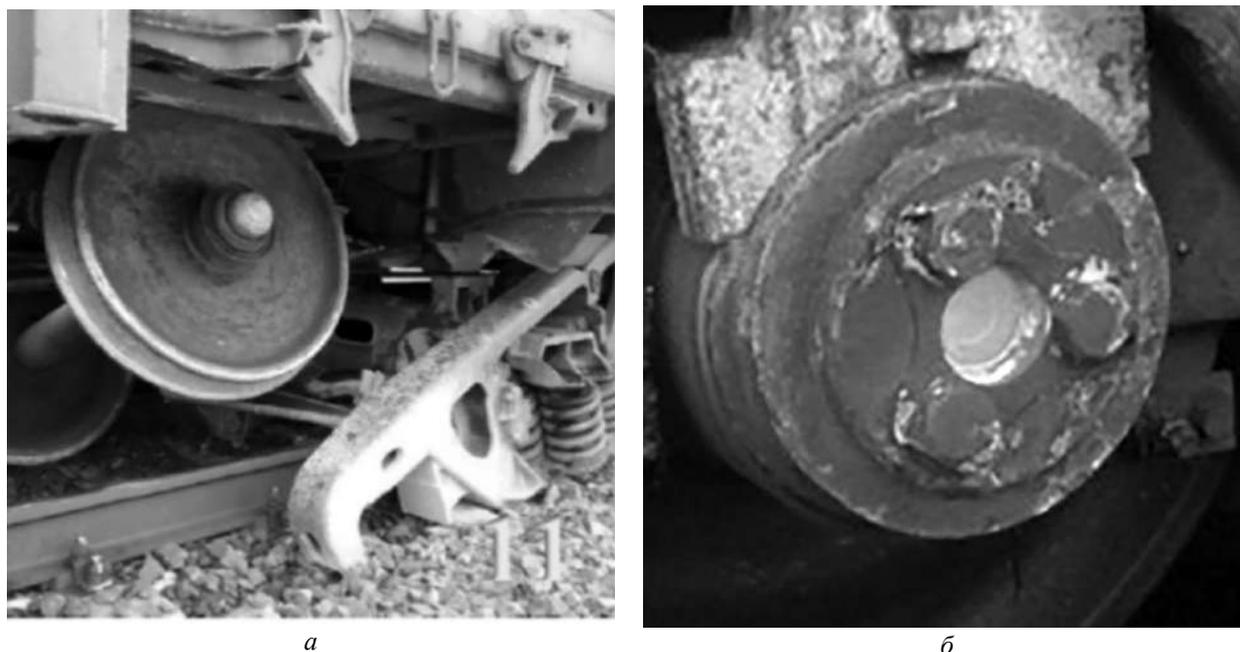


Рис. 3. Крушение грузовых поездов вследствие излома боковой рамы (а) и горячего излома шейки оси (б)
Fig. 3. Crash of freight trains due to a fracture of the side frame (a) and hot fracture of the axle journal (b)

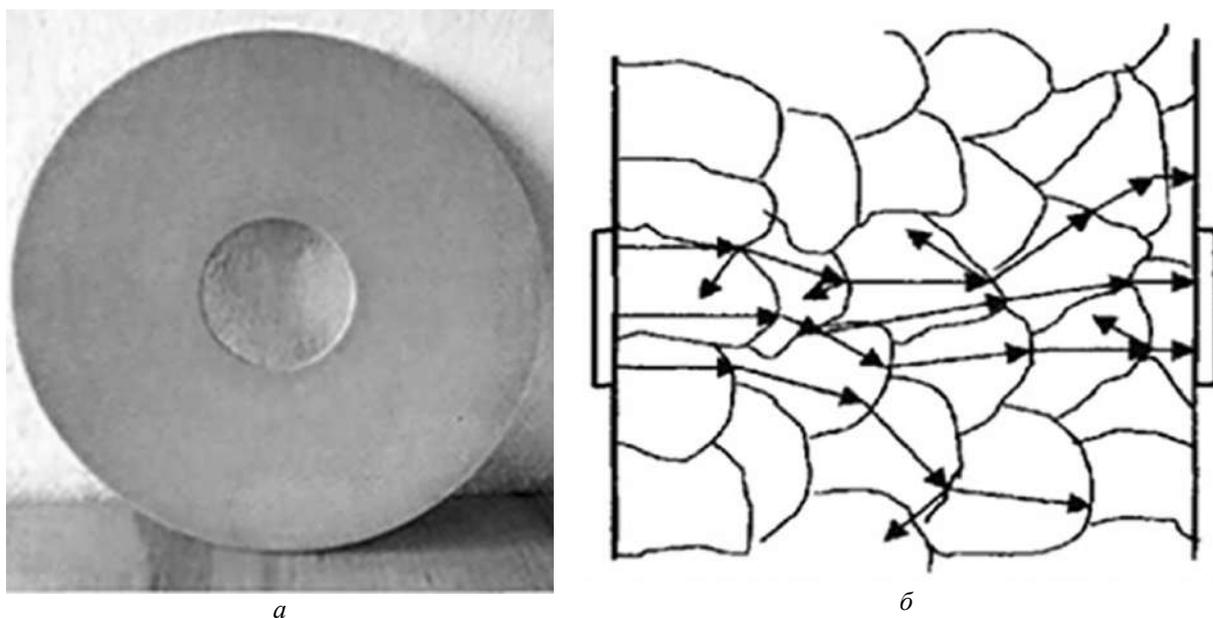


Рис. 4. Общий вид самосмазываемой пластины, содержащей многостенные углеродные нанотрубки (а) и ход лучей в крупнозернистых материалах (б)

Fig. 4. General view of a self-lubricating plate containing multi-walled carbon nanotubes (a) and path of rays in coarse-grained materials (b)

материалы с улучшенными характеристиками [12–14]. Добавление в полимерную матрицу многослойных углеродных трубок поможет снизить (до 8 раз) коэффициент трения и привести к значительному (до 3 000 раз) снижению износа полимерного материала [15]. Это явление

основано на динамическом переходе (*поглощение и рассеяние*) в пористом теле, имеющем нанометровые размеры пор.

При поглощении энергия упругих волн преобразуется в другие виды энергии, в частности в тепловую энергию. При этом происходят

процессы преломления и отражения в упругих средах, характеризующиеся наноразмерными геометрическими параметрами. (рис. 4). На поглощение влияет теплопроводность среды и внутреннее трение.

Рассеяние происходит в результате преломления и отражения волн на границах кристаллов или включениях в неоднородных материалах, которые характеризуются наноразмерными геометрическими параметрами.

В поликристаллических твердых телах процесс рассеяния преобладает над поглощением.

На скорость распространения ультразвуковых волн в поликристаллических твердых телах влияет направление падающей волны к осям кристалла.

При переходе луча из одного зерна в другое возникают отражение, преломление и трансформация волн.

Соотношение между длиной волны λ и средним размером зерна D определяется коэффициентом затухания.

Заключение

Значение коэффициента затухания особенно велико, если средний размер (D) зерна по отношению длины волны составляет $\lambda = (3-4)D$.

Таким образом, доказано, что обеспечение равного эксплуатационного срока службы колеса и кассетного буксового узла можно достичь за счет снижения коэффициента трения в узлах «пятник – подпятник» грузового вагона примерно до коэффициента трения ($f = 0,04$) [12, 17, 18].

Выравнивание по эксплуатационному пробегу ответственных элементов грузового вагона (включая колесо грузового вагона и кассетный буксовый узел) позволит в значительной степени снизить количество вынужденных обточек грузовых колес, исключить из практики повторное использования кассетных подлинников и, тем самым, в значительной мере снизить количество крушений грузовых поездов.

Список литературы

1. Лукс Д.Ю. Оценка динамических качеств грузового вагона, оснащенного тележкой 18–9855 // Известия Транссиба. 2017. №4 (32). С. 16–25.
2. Пути снижения износа гребней колес подвижного состава / В.Н. Кашников, В.М. Рубан, М.В. Гуськова и др. // Вестник РГУПС. 2000. № 3. С. 52–55.
3. Бунькова Т.Г. Об оптимальном соотношении твердости цельнокатаного колеса грузового вагона и железнодорожного рельса // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 1. С. 86–90.
4. Бунькова Т.Г., Ражковский А.А., Петракова А.Г. Обоснование выбора соотношения твердости цельнокатаного колеса и железнодорожного рельса // Инновации для транспорта : сб. статей Междунар. науч.-техн. конф. Омск, 2010. Ч. 1. С. 74–78.
5. Как должны работать сервисные центры для вагонов на кассетных подшипниках // Евразия вести : сайт. URL: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2017-05a12&ysclid=19f8f8b7hg116390417> (Дата обращения 04.09.2022).
6. Иванова Т.В., Налабордин Д.Г. Сравнительная оценка интенсивности износа гребней стандартных и инновационных колес грузовых вагонов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 10. С. 459–460.
7. Налабордин Д.Г., Иванова Т.В., Рудаков В.А. Сравнительная оценка интенсивностей износов гребней стандартных и инновационных колес грузовых вагонов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2017. Т. 2. С. 514–518.
8. Савельев И.В. Курс общей физики. Ч. 1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика. М. : Наука, 1970. 511 с.
9. Пат. 103520 Рос. Федерация. Износостойкая защита подпятника надрессорной балки / А.М. Орлова, И.В. Сухих. № 2010144650/11 ; заявл. 02.11.2010 ; опубл. 20.04.2011, Бюл. № 11. 2 с.
10. Пат. 193276 Рос. Федерация. Надрессорная балка с износостойкой защитой подпятника / А.В. Самсонов, А.А. Гореньков, П.М. Нечаев и др. № 2019124900 ; заявл. 05.08.2019 ; опубл. 22.10.2019, Бюл. №30. 9 с.
11. Роцин М.Н. Исследование трибологических свойств новых углеродосодержащих материалов при высоких температурах // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении : науч. тр. VI Междунар. науч. конф. М., 2019. С. 358–359.
12. Савченко М.А. Расчетное обоснование протяженности гарантийного участка пункта технического обслуживания с учетом оценки технического состояния тормозной системы грузовых вагонов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 217 с.
13. Изменение физико-химических свойств стальных узлов и деталей железнодорожного транспорта как метод определения остаточного ресурса / Ю.И. Матяш, Ю.М. Сосновский, А.А. Ражковский и др. // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 9–13.
14. Strengthened electrically conductive composites based on ultra-high molecular weight polyethylene filled with fine graphite / O.V. Lebedev, A.S. Kechek'yan, V.G. Shevchenko et al. // Doklady Chemistry. 2014. Vol. 456. № 2. P. 87–90.
15. Cassagnau P. Rheology of Carbon Nanoparticle Suspensions and Nanocomposites // Rheology of Non-Spherical Particle Suspensions. 2015. P. 59–75.
16. Elastic hysteretic properties of damping composite materials for rail transport at low temperatures under static and dynamic

loading / E.G. Kurzina, A.G. Kolmakov, Yu.N. Aksenov et al. // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019. № 10. P. 1090–1094.

17. Damping composites from materials with different elastic hysteresis properties for sandwich shock absorbers of railroad transport / E.G. Kurzina, A.G. Kolmakov, V.N. Filippov et al. // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11. № 4. P. 947–954.

18. Петракова А.Г. Влияние криволинейности пути на ресурс колесной пары // *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2021. № 2 (66). С. 31–33.

References

1. Luks D.Yu. Otsenka dinamicheskikh kachestv gruzovogo vagona, osnashchennogo telezhkoi 18–9855 [Evaluation of the dynamic qualities of a freight wagon equipped with a bogie 18–9855]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2017, no. 4 (32), pp. 16–25.

2. Kashnikov V.N., Ruban V.M., Gus'kova M.V., Zhul'kin M.N., Nelyubov V.P., Pavlov A.P. Puti snizheniya iznosa grebnei koles podvizhnogo sostava [Ways to reduce the wear of wheel flanges of rolling stock]. *Vestnik RGUPS* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2000, no. 3, pp. 52–55.

3. Bun'kova, T.G. Ob optimal'nom sootnoshenii tverdosti tsel'nokatanogo kolesa gruzovogo vagona i zheleznodorozhnogo rel'sa [On the optimal ratio of hardness of a solid-rolled wheel of a freight wagon and a railway rail]. *Nauchno–tehnicheskii vestnik Povolzh'ya* [Scientific and technical bulletin of the Volga region], 2011, no. 1, pp. 86–90.

4. Bun'kova T.G., Razhkovskii A.A., Petrakova A.G. Obosnovanie vybora sootnosheniya tverdosti tsel'nokatanogo kolesa i zheleznodorozhnogo rel'sa [Justification for the choice of the ratio of hardness of a solid-rolled wheel and a railway rail]. *Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii «Innovatsii dlya transporta» (v 3-kh chastyakh)* [Proceedings of the International scientific-technical conference «Innovations for transport»]. Omsk, 2010, vol. 1, pp. 74–78.

5. Kak dolzhny rabotat' servisnye tsentry dlya vagonov na kassetnykh podshpnykakh (elektronnyi resurs) [How service centers for wagons on cassette bearings should work (Electronic resource)]. Available at: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2017-05a12&ysclid=19f8fbb7hg116390417> (Accessed September 4, 2022).

6. Ivanova, T.V., Nalabordin, D.G. Sravnitel'naya otsenka intensivnosti iznosa grebnei standartnykh i innovatsionnykh koles gruzovykh vagonov [Comparative assessment of the wear intensity of the ridges of standard and innovative wheels of freight wagons]. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembly in mechanical engineering, instrument making], 2017, no. 10, pp. 459–460.

7. Nalabordin D.G., Ivanova T.V., Rudakov V.A. Sravnitel'naya otsenka intensivnosti iznosov grebnei standartnykh i innovatsionnykh koles gruzovykh vagonov [Comparative assessment of the wear rates of the ridges of standard and innovative wheels of freight wagons]. *Materialy VIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the VIII International scientific-practical conference «Transport infrastructure of Siberian region»], 2017, vol. 2, pp. 514–518.

8. Savel'ev I.V. Kurs obshchei fiziki (V 3-kh chastyakh). Ch. 1. Mekhanika, kolebaniya i volny, molekulyarnaya fizika [Course of general physics (In 3 volumes). Vol. 1. Mechanics, oscillations and waves, molecular physics]. Moscow: Nauka Publ., 1970. 511 p.

9. Orlova A.M., Sukhikh I.V. Patent RU 103520 U1, 20.04.2011.

10. Samsonov A.V., Goren'kov A.A., Nechaev P.M., Abakumov A.A., Vlasko A.S. Patent RU 193276 U1, 22.10.2019.

11. Roshchin M.N. Issledovanie tribologicheskikh svoystv novykh uglerodosoderzhashchikh materialov pri vysokikh temperaturakh [Study of the tribological properties of new carbon-containing materials at high temperatures]. *Nauchnye trudy VI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Fundamental'nye issledovaniya i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii»* [Proceedings of the VI International scientific conference «Fundamental research and innovative technologies in mechanical engineering»]. Moscow, 2019, pp. 358–359.

12. Savchenko M.A. Raschetnoe obosnovanie protyazhennosti garantiinogo uchastka punkta tekhnicheskogo obsluzhivaniya s uchetom otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya tormoznoy sistemy gruzovykh vagonov [Calculation substantiation of the length of the warranty section of the maintenance point, taking into account the assessment of the technical condition of the brake system of freight wagons]. Ph.D.'s thesis. Moscow, 2019. 217 p.

13. Matyash Yu.I., Sosnovskii Yu.M., Razhkovskii A.A., Kondrikov E.M. Izmenenie fiziko–khimicheskikh svoystv stal'nykh uzlov i detalei zheleznodorozhnogo transporta kak metod opredeleniya ostatochnogo resursa [Change of physic – chemical properties of steel units and parts for railway transport as a method of determining the master current resource]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk scientific bulletin], 2017, no. 4 (154), pp. 9–13.

14. Lebedev O.V., Kechek'yan A.S., Shevchenko V.G., Kurkin T.S., Beshenko M.A., Ozerin A.N. Strengthened electrically conductive composites based on ultra-high molecular weight polyethylene filled with fine graphite. *Doklady Chemistry*, 2014, vol. 456, no. 2, pp. 87–90.

15. Cassagnau P. Rheology of Carbon Nanoparticle Suspensions and Nanocomposites. *Rheology of Non–Spherical Particle Suspensions*. 2015, pp. 59–75.

16. Kurzina E.G., Kolmakov A.G., Aksenov Yu.N., Kurzina A.M., Bogachev A.Yu., Semak A.V. Elastic hysteretic properties of damping composite materials for rail transport at low temperatures under static and dynamic loading. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2019, no. 10, pp. 1090–1094.

17. Kurzina E.G., Kolmakov A.G., Filippov V.N., Semak A.V., Kurzina A.M. Damping composites from materials with different elastic hysteresis properties for sandwich shock absorbers of railroad transport. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 947–954.

18. Petrakova A.G. Vliyaniye krivolineinosti puti na resurs kolesnoi pary [Influence of path curve-linearity on the resource of a wheel pair]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo* [Wagons and wagon facilities], 2021, no. 2 (66), pp. 31–33.

Информация об авторах

Матяш Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: matiash41@mail.ru.

Родченко Александр Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: Rodchenko_57@mail.ru.

Петракова Анна Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: petra-anna@yandex.ru.

Information about the authors

Yurii I. Matyash, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Wagons and wagon facilities, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: matiash41@mail.ru.

Alexander D. Rodchenko, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Wagons and wagon facilities, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: rodchenko_57@mail.ru.

Anna G. Petrakova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Wagons and wagon facilities, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: petra-anna@yandex.ru.

Применение методов анализа ассортимента в целях совершенствования закупочной деятельности в структурных подразделениях холдинга ОАО «РЖД»

Н.Н. Григорьева✉, Т.Н. Черняева

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

✉zolutkina@mail.ru

Резюме

Закупочная деятельность, являясь особым элементом системы материально-технического обеспечения, формирует экономические отношения в области поставок необходимых материально-технических ресурсов между структурными подразделениями железнодорожного транспорта. Эффективность ее организации – одно из основных условий успешной работы структурных подразделений холдинга ОАО «РЖД». Совершенствование закупочной деятельности способствует росту объема товарооборота, снижению издержек на закупку и хранение товара, а значит улучшению финансового состояния компании и повышению эффективности ее деятельности. Дирекция железнодорожных вокзалов имеет недостаточно продуктивную структуру закупочной деятельности, которая не обеспечивает рациональную закупку сопутствующих товаров в дороге. Процесс закупочной деятельности в Дирекции железнодорожных вокзалов ведется с использованием традиционных методов, без привлечения дополнительных специалистов в области закупок и средств автоматизации, вследствие этого у нее возникают проблемы в организации и планировании данного вида деятельности, что является барьером для рационального и эффективного построения всей системы управления оборотными средствами. В статье автор предлагает оптимизировать процесс закупки сопутствующих товаров, опираясь на структуру имеющихся ресурсов закупочной деятельности. Проведен комплексный анализ ассортимента продукции методом, позволяющим классифицировать ресурсы дирекции по степени их важности. Результатом анализа является группировка объектов по уровню влияния на общий результат деятельности дирекции. Совершенствование процесса закупочной деятельности относительно сопутствующих товаров заключается в выявлении дополнительной прибыли при прогнозировании и устранении возможных ее потерь.

Ключевые слова

закупочная деятельность, ABC-анализ, ассортиментный ряд, объем продаж, дополнительная прибыль, железнодорожный транспорт

Для цитирования

Григорьева Н.Н. Применение методов анализа ассортимента в целях совершенствования закупочной деятельности в структурных подразделениях холдинга ОАО «РЖД» / Н.Н. Григорьева, Т.Н. Черняева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 60–72. DOI 10.26731/1813-9108.2023.(77).60-72.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 28.11.2022 г.; поступила после рецензирования: 15.03.2023 г.; принята к публикации: 16.03.2023 г.

Application of assortment analysis methods in order to improve procurement activities in the structural divisions of the holding JSC «Russian Railways»

N.N. Grigor'eva✉, T.N. Chernyaeva

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉zolutkina@mail.ru

Abstract

Procurement activity, being a special element of the logistics system, forms economic relations in the field of supply of necessary material and technical resources between structural divisions of railway transport. The effectiveness of its organization is one of the main conditions for the successful operation of the holding's structural divisions. The improvement of procurement activities contributes to the growth of trade turnover, reducing the cost of purchasing and storing goods, and therefore to the improvement of the financial condition and increase the efficiency of its activities. The Directorate of railway stations has an insufficiently productive structure of procurement activities that does not provide rational purchase of related goods for the road. The process of procurement activities in the Directorate of Railway Terminals is carried out using traditional methods, without involving additional specialists in the field of procurement and automation resulting in the problems in the organization and planning of this type of activity producing barriers to the rational and effective construction of the entire working capital management system. In the article the author suggests optimizing the process of purchasing related products, based on the structure of available procure-

ment resources. A comprehensive analysis of the product range is carried out by a method that allows to classify the resources of the directorate according to the degree of importance. The result of the analysis is the grouping of objects according to the degree of influence on the overall result of the directorate's activities. The improvement of the procurement process with respect to related products consists in identifying additional profits while forecasting and eliminating possible losses.

Keywords

purchasing activity, ABC analysis, assortment range, sales volume, additional profit, railway transport

For citation

Grigor'eva N.N., Chernyaeva T.N. Primenenie metodov analiza assortimenta v tselyakh soverhenstvovaniya zakupochnoi deyatelnosti v strukturnykh podrazdeleniyakh kholdinga OAO «RZhD» [Application of assortment analysis methods in order to improve purchasing activities in the structural divisions of the holding JSC «Russian Railways»]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 60–72. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).60-72.

Article Info

Received: November 28, 2022; Revised: March 15, 2023; Accepted: March 16, 2023.

Введение

Для правильной расстановки приоритетов между товарами и принятия решения об исключении из ассортиментного ряда той или иной продукции проводится комплексный анализ продаж. К числу таких методов относится ABC-анализ [1, 2].

Анализ существующей структуры закупок региональной дирекции железнодорожных вокзалов

Рассмотрим анализ существующей структуры закупок в первую очередь методом ABC-анализа по признаку фактической потребности в товаре (рис 1, табл. 1), поскольку ABC-анализ – это универсальный в своем роде инструмент, позволяющий анализировать данные по продажам, дебиторскую задолженность, а также выявлять целевую аудиторию и формировать ассор-

тимент наиболее востребованной продукции. Данный метод активно используется отделами продаж, финансов и закупок на предприятии [3].

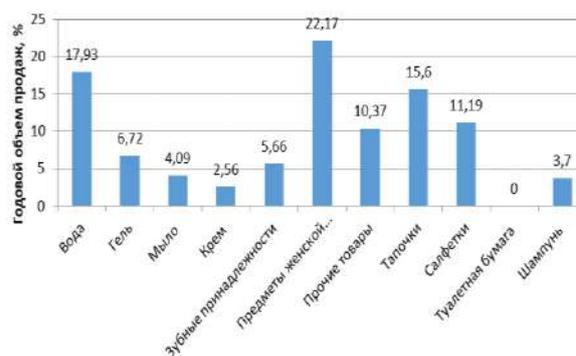


Рис. 1. Показатели объема продаж за 2019 г.
Fig. 1. Sales figures for 2019

Таблица 1. Анализ ассортимента за 2019 г.

Table 1. Assortment analysis for 2019

№	Группы товаров Product groups	Средняя стоимость за ед. товара, руб. Average cost per unit. product, rub.	Количество, шт. Quantity, pcs.	Средняя стоимость товара за год, руб. The average cost of the product for the year, rub.	Годовой объем продаж, % Annual sales volume, %
1	2	3	4	5	6
1	Вода в ассортименте Water in assortment	9,96	974,00	9 701,04	17,93
2	Гель и шапочка для душа, гель для тела Shower gel and cap, body gel	7,77	468,00	3 636,36	6,72
3	Мыло в ассортименте Soap in assortment	13,50	164,00	2 214,00	4,09
4	Крем в ассортименте Cream in assortment	26,61	52,00	1 383,72	2,56

Окончание таблицы 1

End of table 1

1	2	3	4	5	6
5	Зубные принадлежности в ассортименте Dental accessories in assortment	12,75	240,00	3 060,00	5,66
6	Предметы женской интимной гигиены Women's intimate hygiene items	14,84	808,00	11 990,72	22,17
7	Прочие товары Other goods	8,40	668,00	5 611,20	10,37
8	Тапочки в ассортименте Slippers in assortment	21,70	389,00	8 441,30	15,60
9	Салфетки в ассортименте, носовые платки, ватные диски и палочки Assorted napkins, handkerchiefs, cotton pads and sticks	11,73	516,00	6 052,68	11,19
10	Туалетная бумага в ассортименте Toilet paper in assortment	0,00	0,00	0,00	0,00
11	Шампунь в ассортименте Shampoo in assortment	2,65	756,00	2 003,40	3,70
Итого Total		–	5 035,00	54 094,42	100,00

Далее построим ранжированный ряд в порядке убывания по исследуемым объектам (см. табл. 1) [4] и рассчитаем долю анализируемого параметра нарастающим итогом.

Исходя из данных табл. 1 и рис. 1, разбиваем товары на три категории в соответствии с методикой [5]. Таким образом, получаем, что к категории А можно отнести группы № 1, 6–9 (вода, предметы женской интимной гигиены, прочие товары, тапочки, салфетки), эти группы товаров следует закупать в наибольшем количестве; к категории В относим группы № 2, 3, 5 (гель, мыло, зубные принадлежности); к категории С – группы № 4, 10, 11 (крем, туалетная бумага, шампунь), от закупки товаров этой группы можно не отказываться, потому что покупателям зачастую важно иметь большой выбор этих товаров, хоть доход от них минимальный, закупать их рекомендуется в минимально допустимом количестве. Следовательно, можно высчитать количественную и стоимостную долю каждой категории (табл. 2). Аналогично рассчитывается

годовой объем продаж [6] и вычисляется доля прибыли по каждой группе товара в 2020 г. (табл. 3, рис. 2).

Аналогично 2020 г. Разбиваем товары на три категории в соответствии с классической методикой (табл. 4). Исходя из данных табл. 3 и рис. 2, получаем, что к категории А можно отнести группы № 1, 5, 6, 8 и 9 (вода, зубные принадлежности, предметы женской интимной гигиены, тапочки, салфетки), эти группы товаров следует закупать в наибольшем количестве; к категории В относим группы № 2, 4, 7 (гель, крем, прочие); к категории С – группы № 3, 10, 11 (мыло, туалетная бумага, шампунь), от закупки товаров этой группы можно вообще отказаться, потому что доход от них минимальный, даже меньше, чем в 2016 г. Следовательно, можно высчитать количественную и стоимостную долю каждой категории (табл. 4). Также рассчитываем годовой объем продаж и вычисляем долю прибыли по отдельным группам товаров за 2021 г. (табл. 5, рис. 3).

Таблица 2. Определение категории группы товаров на основании ассортимента 2016 г.

Table 2. Group of goods category determination based on the assortment of 2016

Категория Category	Количественная доля, % Quantitative share, %	Стоимостная доля, % Cost share, %
А	45,46	77,27
В	27,28	16,47
С	27,26	6,26

Таблица 3. Анализ ассортимента за 2020 г.
Table 3. Assortment analysis for 2020

№	Группы товаров Product groups	Средняя стоимость за ед. товара, руб. Average cost per unit product, rub.	Количество, шт. Quantity, pcs.	Средняя стоимость товара за год, руб. The average cost of the product for the year, rub.	Годовой объем продаж, % Annual sales volume, %
1	Вода в ассортименте Water in assortment	10,71	1 560,00	16 707,60	12,74
2	Гель и шапочка для душа, гель для тела Shower gel and cap, body gel	5,24	1 342,00	7 032,08	5,36
3	Мыло в ассортименте Soap in assortment	4,72	767,00	3 620,24	2,76
4	Крем в ассортименте Cream in assortment	33,65	365,00	12 282,25	9,36
5	Зубные принадлежности в ассортименте Dental accessories in assortment	24,80	740,00	18 352,00	13,99
6	Предметы женской интимной гигиены Women's intimate hygiene items	5,58	2 340,00	13 057,20	9,95
7	Прочие товары Other goods	7,98	810,00	6 463,80	4,93
8	Тапочки в ассортименте Slippers in assortment	25,21	595,00	14 999,95	11,43
9	Салфетки в ассортименте, носовые платки, ватные диски и палочки Assorted napkins, handkerchiefs, cotton pads and sticks	15,49	2 210,00	34 232,90	26,10
10	Туалетная бумага в ассортименте Toilet paper in assortment	8,01	277,00	2 218,77	1,69
11	Шампунь в ассортименте Shampoo in assortment	2,20	1 007,00	2 215,40	1,69
Итого		–	12 013,00	13 1182,19	100,00

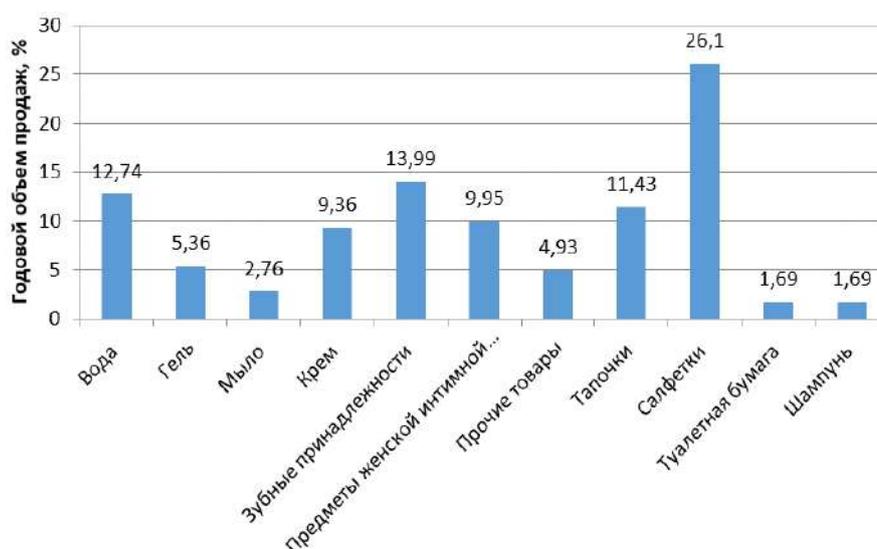


Рис. 2. Показатели объема продаж за 2020 г.
Fig. 2. Sales figures for 2020

Таблица 4. Определение категории группы товаров на основании ассортимента 2020 г.**Table 4.** Determining the category of a product group based on the 2020 assortment

Категория Category	Количественная доля, % Quantitative share, %	Стоимостная доля, % Cost share, %
A	45,46	74,21
B	27,28	19,65
C	27,26	6,14

Таблица 5. Анализ ассортимента за 2021 г.**Table 5.** Assortment analysis for 2021

№	Группы товаров Groups of goods	Средняя стоимость за ед. товара, руб. Average cost per unit goods, rub	Количество, шт. Quantity, pcs.	Средняя стоимость товара, руб. в год Medium price goods, rub. in year	Годовой объем продаж, % Annual sales volume, %
1	Вода в ассортименте Water in assortment	18,41	1 184,00	21 797,44	56,14
2	Гель и шапочка для душа, гель для тела Shower gel and cap, body gel	5,20	250,00	1 300,00	3,35
3	Мыло в ассортименте Soap in assortment	9,00	9,00	81,00	0,21
4	Крем в ассортименте Cream in assortment	0,00	0,00	0,00	0,00
5	Зубные принадлежности в ассортименте Dental accessories in assortment	0,00	0,00	0,00	0,00
6	Предметы женской интимной гигиены Women's intimate items hygiene	67,29	208,00	13 996,32	36,05
7	Прочие товары Other goods	4,58	100,00	458,00	1,18
8	Тапочки в ассортименте Slippers in assortment	0,00	0,00	0,00	0,00
9	Салфетки в ассортименте, носовые платки, ватные диски и палочки Assorted napkins, handkerchiefs, cotton pads and sticks	9,45	80,00	756,00	1,95
10	Туалетная бумага в ассортименте Toilet paper in assortment	0,00	0,00	0,00	0,00
11	Шампунь в ассортименте Shampoo in assortment	2,20	200,00	440,00	1,13
Итого Total		–	2 031,00	38 828,76	100,00

Аналогично 2019 и 2020 гг. Разбиваем товары на три категории (табл. 6). Исходя из данных табл. 5 и рис. 3, получаем, что к категории А можно отнести группу № 1 (вода); к категории В относим группу № 6 (предметы женской интимной гигиены); к категории С – относятся все остальные группы. Следовательно, в большем количестве можно закупать товары, принадлежащие к категории А и В. От закупки товаров группы С можно вообще от-

казаться. Далее также высчитываем количественную и стоимостную долю каждой категории (табл. 6).

Данная информация будет служить основой для прогнозирования спроса на последующие годы. Спрогнозировав спрос, сформируем план продаж по товарным группам. На основе плана продаж будет составлен план поставок: объем и время пополнения запаса для удовлетворения потребности в товаре.

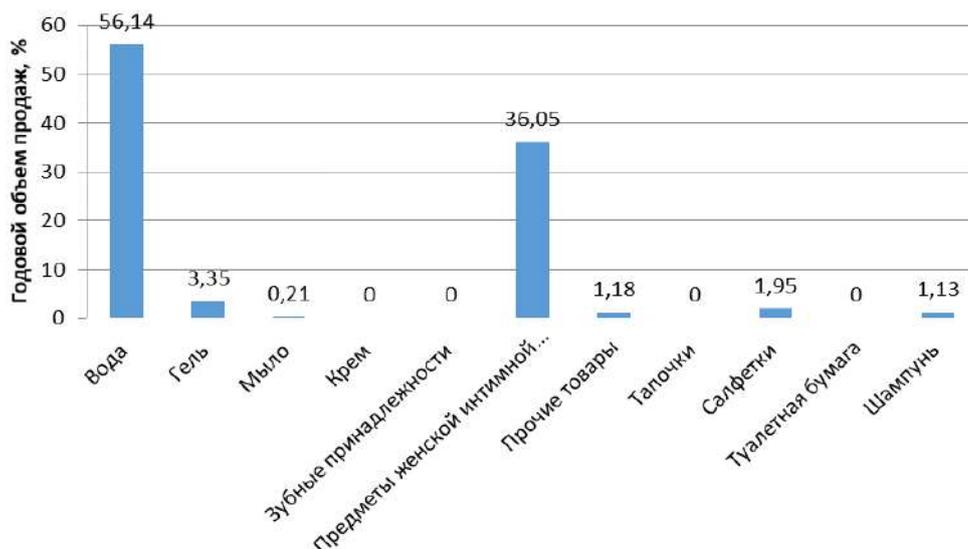


Рис. 3. Показатели объема продаж за 2021 г.
Fig. 3. Sales figures for 2021

Таблица 6. Определение категории группы товаров на основании ассортимента 2021 г.

Table 6. Determining the category of a product group based on the 2021 assortment

Категория Category	Количественная доля, % Quantitative share, %	Стоимостная доля, % Cost share, %
A	9,09	56,14
B	9,09	36,05
C	81,82	7,82

Анализ динамики спроса каждой товарной группы методом XYZ-анализа [5, 7] дает возможность определить характер потребления популярных товаров. Результаты такого анализа позволяют оптимизировать складские запасы.

XYZ-анализ предусматривает группировку товаров по трем группам [8]. Группа X включает товары со стабильным спросом, при этом коэффициент вариации таких товаров составляет до 10 %. Группа Y характеризует товары, спрос на которые нестабилен и коэффициент вариации их колеблется от 10 до 25 %. В группу Z входят товары, спрос на которые спрогнозировать практически невозможно, их коэффициент вариации составляет более 25 %. Данные для определения категории за 2019 г. представлены в табл. 7.

Самый устойчивый спрос в 2019 г. сформировался на зубные принадлежности, гель и

прочие товары, попавшие в группу X, при этом среднемесячный объем продаж отклоняется всего на 3–4 %. Если имеются запасы этих позиций на складе, необходимо их предлагать к продаже.

Таблица 7. Определение категории группы товаров за 2019 г.

Table 7. Determination of the product group category for 2019

Категория Category	Количество групп Quantity of groups	Соотношение, % Correlation, %
X	3	27,3
Y	3	27,3
Z	5	45,4

Запасы товаров из группы Z (шампунь, мыло, крем, вода, туалетная бумага) можно либо сократить, либо перейти по этим наименованиям на предварительный заказ.

Аналогично рассмотрим XYZ-анализ за 2020 г. (табл. 8). В группу X не попала ни одна группа товаров, которые имеют самый устойчивый спрос. Объем продаж – 0,00 %, т.е. можно с уверенностью сказать, что закупка сопутствующего товара в дорогу в 2020 г. была совершенно нерациональной. Группа Y составила 27,3 % (тапочки, предметы женской гигиены и прочие товары), а вот на группу Z пришлось больше всего – 72,7 %.

Таблица 8. Определение категории группы товаров за 2020 г.

Table 8. Product group category definition for 2020

Категория Category	Количество групп Quantity of groups	Соотношение, % Correlation, %
X	–	–
Y	3	27,3
Z	8	72,7

Также рассмотрим XYZ-анализ за 2021 г. (табл. 9).

Таблица 9. Определение категории группы товаров за 2021 г.

Table 9. Product group category definition for 2021

Категория Category	Количество групп Quantity of groups	Соотношение, % Correlation, %
X	2	18,2
Y	4	36,4
Z	5	45,4

Анализ 2021 г. показал, что самый устойчивый спрос имеется на туалетную бумагу и гель, отклонение среднемесячного объема продаж всего 3–9 % по товарам группы X.

Группа Y составила 36,4 % – крем, вода, тапочки, и прочие товары. Запасы товаров из

группы Z рекомендуется сократить либо обеспечивать по ним предварительный заказ.

Построение и изучение матрицы по видам анализа

Результаты двойного анализа за 2019 г. позволяют создать матрицу [4, 9], где каждый товар будет включен в одну из девяти групп (табл. 10).

Матрица показывает необходимость постоянного наличия товара с высоким объемом продаж [10] и стабильностью – группы AX и BX (№ 7, 8 и 2, 5), однако при этом не создавая страховой запас в избытке [11], поскольку спрос на эту группу является прогнозируемым.

Необходимость наибольшего внимания составляют товары группы AY (№ 6 и 9), обеспечивающие наибольший объем продаж и пользующиеся достаточно стабильным спросом.

Высокий уровень продаж и низкую прогнозируемость спроса показывают товары групп AZ и BZ (№ 1 и 3). Обеспеченность постоянного наличия товаров данной группы рекомендуется осуществлять через более частные поставки, работу с надежными поставщиками и тщательную организацию контроля над расходом этих товаров.

Группу товаров CZ составляют позиции № 4, 10 и 11, их лучше вывести из ассортимента либо регулярно его контролировать по причине неликвидности этих товаров, приносящих финансовые потери Дирекции железнодорожных вокзалов.

Аналогично можно создать матрицу по

Таблица 10. Матрица ABC- и XYZ-анализа за 2019 г.

Table 10. Matrix of ABC- and XYZ-analysis for 2019

Группа Group	X	Y	Z
A	№ 7, 8 (прочие товары, тапочки) other goods, slippers	№ 6, 9 (предметы женской интимной гигиены, салфетки носовые платки, ватные диски и палочки) feminine hygiene items, napkins handkerchiefs, cotton pads and sticks	№ 1 (вода) water
B	№ 2, 5 (гель и шапочка для душа, губка для тела, зубные принадлежности) shower gel and cap, body sponge, dental supplies	–	№ 3 (мыло в ассортименте) soap in assortment
C	–	–	№ 4, 10, 11 (крем, туалетная бумага, шампунь) cream, toilet paper, shampoo

результатам двойного анализа за 2020 г. (табл. 11).

В 2020 г. имели достаточно стабильный спрос и обеспечивали наибольший объем продаж товары групп АУ и ВУ (№ 6, 8 и 7), соответственно им уделяется наибольшее внимание. Возможность получения более высокого уровня продаж, но низкую прогнозируемость спроса дают товары групп АЗ и ВЗ (№ 1, 2, 4, 5, 9), рекомендации для них и для группы товаров СЗ (позиции № 3, 10 и 11) будут аналогичными 2019 г.

Таким же образом составляем матрицу за 2021 г (табл. 12).

Из анализа матрицы видно, что группа товаров АУ (№ 1) имеет наибольший объем продаж и пользуются достаточно стабильным спросом. Отличительными особенностями, в частности высокими продажами и низкой прогнозируемостью спроса, обладают товары группы ВЗ (№ 6). Существует возможность снижения страхового запаса [12] до минимального уровня, если использовать систему управления запасами [13] с постоянной периодичностью между заказами для товаров группы СХ (№ 2 и 10).

Исходя из имеющихся у дирекции финансовых ресурсов по товарам группы СУ (№ 4, 7, 8) можно перейти на систему с постоян-

ным объемом заказа, но при этом формировать страховой запас.

Требуют вывода из ассортимента позиции № 3, 5, 9 и 11 из группы товаров СЗ.

Формирование плана закупок на следующий период

На основании проведенных ABC- и XYZ-анализа за 2019–2021 гг. компании необходимо спрогнозировать общую фактическую потребность в запасе каждой товарной группы на следующий отчетный период. По данным о будущих продажах, текущем состоянии запаса формируются основные рекомендации по закупкам для каждой товарной группы.

В рамках существующих ограничений и выполнении требований оптимизации полученного дохода от продажи всех наименований продукции [14], в процессе совершенствования товарных запасов планирование объемов каждой группы товаров [15] для конкретного периода должно быть закуплено в течение будущего года.

Решение данной задачи видится опять же с помощью определения средних значений, проведенных ABC- и XYZ-анализами.

Товары группы ВХ (№ 2) отличает высокий товарооборот и стабильность. Необходимо

Таблица 11. Матрица ABC- и XYZ-анализа за 2020 г.

Table 11. Matrix of ABC- and XYZ-analysis for 2020

Группа Group	X	Y	Z
A	–	№ 6, 8 (предметы женской интимной гигиены, тапочки) women's items intimate hygiene, slippers	№ 1, 5, 9 (вода, зубные принадлежности, салфетки, носовые платки, ватные диски и палочки) water, dental supplies, wipes, handkerchiefs, cotton pads and sticks
B	–	№ 7 (прочие товары) other goods	№ 2, 4 (гель и шапочка для душа, гель для тела, крем) shower gel and cap, body gel, cream
C	–	–	№ 3, 10, 11 (мыло, туалетная бумага, шампунь) soap, toilet paper, shampoo

Таблица 12. Матрица ABC- и XYZ-анализа за 2021 г.

Table 12. Matrix of ABC- and XYZ-analysis for 2021

Группа Group	X	Y	Z
A	–	№ 1 (вода)	–
B	–	–	№ 6 (предметы женской интимной гигиены) women's items intimate hygiene
C	№ 2, 10 (гель и шапочка для душа, гель для тела, туалетная бумага) shower gel and cap, body gel, toilet paper	№ 4, 7, 8 (крем, прочие товары, тапочки) other goods, slippers	№ 3, 5, 9, 11 (мыло, зубные принадлежности, салфетки, носовые платки, ватные диски и палочки, шампунь) soap, dental supplies, wipes, handkerchiefs, cotton pads and sticks, shampoo

обеспечить постоянное наличие товара, но для этого не нужно создавать избыточный страховой запас, в связи с тем, что расход товаров этой группы стабилен и хорошо прогнозируется.

Проведенные исследования доказывают, что при высоком товарообороте товары группы ВУ (№ 8) имеют недостаточную стабильность продаж, и, как следствие, чтобы обеспечить их постоянное наличие, нужно увеличить страховой запас.

Попытка обеспечить гарантированное наличие по всем товарам групп АЗ и ВЗ (№ 1, 3, 9) при высоком товарообороте и отличающихся низкой прогнозируемостью продаж только за счет избыточного страхового товарного запаса приведет к тому, что средний товарный запас компании значительно увеличится. По товарам данной группы рекомендуется пересмотреть систему заказов. Часть товаров нужно перевести на систему заказов с постоянной суммой (объемом) заказа, по части товаров необходимо обеспечить более частые поставки, повысить периодичность контроля.

Возможен переход на систему с постоянной суммой (объемом) заказа по товарам группы СУ (№ 7), но при этом должен формироваться страховой запас исходя из имеющихся у компании возможностей.

Группа товаров CZ (№ 4, 5, 10, 11) характеризуется мало востребованными товарами, товарами спонтанного спроса, поставляемыми под заказ и т.п. Часть этих товаров можно безболезненно выводить из ассортимента, а другую часть нужно регулярно контролировать, так как именно из товаров этой группы возникают неликвидные или труднореализуемые товарные запасы, от которых, как было сказано ранее, дирекция несет убытки. Выводить из ассортимента необходимо остатки товаров, взятых под заказ или уже не выпускающихся.

Проведенные исследования по данным ABC-и XYZ-анализа выступают основанием для формирования плана закупок на следующий период (табл. 13).

Таким образом, проведенный анализ позволил сократить расходы на 13 875,76 руб. (при учете, что доходы от сбыта сопутствующих товаров выросли на 60 тыс. руб. или на 86,96 %).

Совершенствование планирования и управления закупочной деятельностью в региональной дирекции железнодорожных

ВОКЗАЛОВ

Принятие решения с помощью инициативного метода возможно станет причиной сокращения прибыли предприятия, следовательно, управление закупочной деятельностью должно базироваться на информации, полученной с помощью специализированного программного обеспечения, а также необходимо сосредоточение всего объема работ в рамках должностной инструкции одного работника (инженера). Это очень удобно, особенно в периоды отпусков, отсутствия на работе по причине больничного листа и т.д. одного из работников (например, юриста), принимающих участие в процессе закупок сопутствующих товаров.

Результаты аналитических исследований являются основанием для применения их в практике по совершенствованию планирования и управления закупочной деятельностью в региональной Дирекции железнодорожных вокзалов.

Для решения широкого спектра задач автоматизации учета и управления закупками, стоящих перед динамично развивающимися современными предприятиями, предлагается осуществлять с помощью компьютерной программы «1С: Предприятие 8. Управление торговлей».

В современных производственных условиях прогнозирование объемов сбыта регулярно потребляемых товаров и осуществление их своевременной закупки производится с помощью данного программного обеспечения.

Рекомендуемый горизонт планирования закупок один год, что позволит руководству дирекции «видеть» перспективы на среднесрочный период времени и увязывать их с общей стратегией ее деятельности, а также держать складские остатки под четким контролем, не допуская необоснованного роста объемов складских запасов, так и роста упущенной выгоды компании.

В поэтапном управлении закупками значимое место отводится маркетинговым исследованиям [16], проводимым с использованием инструментов ABC- и XYZ-анализа, для выявления товарных позиций, пользующихся наибольшим спросом среди потребителей.

Кроме того, для рационализации деятельности и сокращения временных и финансовых затрат [17], выполнения работы по плану закупок [18] необходимо пересмотреть обязанности должностной инструкции инженера, дополнив их обязанностями, которые ранее выполнял юрист.

Таблица 13. План закупок на 2021–2022 гг.
Table 13. Procurement plan for 2021–2022

№	Группы товаров	Средняя стоимость за ед. товара, руб. Medium cost per unit goods, rub	Количество, шт. Quantity, pcs	Средняя стоимость товара, руб. в год Average cost of goods, rub. a year	Годовой объем продаж, % Average cost of goods, rub. year, %
1	Вода в ассортименте Water in assortment	9,36	700	6 552	26,26
2	Гель и шапочка для душа, гель для тела Shower gel and cap, body gel	4,8	200	960	3,85
3	Мыло в ассортименте Soap in assortment	2,5	50	125	0,50
4	Крем в ассортименте Cream in assortment	27,5	50	1 375	5,51
5	Зубные принадлежности в ассортименте Dental accessories in assortment	24,7	100	2 470	9,90
6	Предметы женской интимной гигиены Women's intimate hygiene items	17,1	400	6 840	27,41
7	Прочие товары Other goods	4,58	200	916	3,67
8	Тапочки в ассортименте Slippers in assortment	16,5	150	2 475	9,92
9	Салфетки в ассортименте, носовые платки, ватные диски и палочки Assorted napkins, handkerchiefs, cotton pads and sticks	8,3	300	2 490	9,98
10	Туалетная бумага в ассортименте Toilet paper in assortment	7	60	420	1,68
11	Шампунь в ассортименте Shampoo in assortment	2,2	150	330	1,32
Итого Total		–	2 360	24 953	100

Помесячный план закупок на планируемый период рекомендуется осуществлять вторым этапом. Основу плана составляет подробный анализ товарной номенклатуры, прогноз спроса на товары с устойчивым спросом [19] и корректировкой по показателю уровня обслуживания клиентов. Далее необходимо найти решение задачи оптимизации товарных запасов [20] и определить объемы каждого наименования, которое следует закупить, учитывая требования оптимизации полученного дохода от продажи всех наименований продукции. Последовательно решив задачи оптимизации для каждого планируемого отрезка времени, можно составить план закупки для предприятия.

Проведенный ранее анализ реализации со-

путствующих товаров позволил сократить расходы на 13 875,76 руб. Данный расчет получился при разности средней стоимости товаров за 2018 г. (38 828,76 руб.) и при плане закупок на 2019–2020 гг. (24 953 руб.) Доходы от сбыта сопутствующих товаров выросли на 60 тыс. руб. за счет увеличения объема продаж и примененной индексации.

При освобождении юрисконсульта от работы по закупочной деятельности будет достигнута экономия в 187 699,2 руб. в год.

Стоимость программы «1С: Предприятие 8. Управление торговлей» – 35 000 руб. Годовая лицензия программы на одно рабочее место (дополнительные затраты) – 7 500 руб.

Пересмотрев и дополнив должностную

инструкцию инженера функциями за дополнительную плату (20 %), необходимо обучить сотрудника программе 1С. Для обучения данного специалиста затраты составят 16 000 руб. (прохождение курсов обучения по программе в Иркутском государственном университете путей сообщения). Таким образом, затраты на внедрение программы составят 58 500 руб. Таким образом, затраты на внедрение программы составят 58 500 руб.

Кроме этих затрат необходимо произвести расчет дополнительной оплаты труда инженеру за добавившиеся функции (20 %). Оклад инженера составляет 31 200,00 руб. Рассчитаем заработную плату инженера по формуле:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{фот}} = 12 \cdot 31\,200 \cdot 1,6 + 179\,812 = 778\,752 \text{ руб./год}$$

Так как инженер будет получать свою заработанную плату в полном объеме, как и ранее, то нам нужно рассчитать только процент доплаты за дополнительную работу по закупкам. Таким образом, доплата составит 155 750,4 руб. в год.

Внедрение программы не отразится на накладных и прочих расходах дирекции, они рассматриваются как неизменные, поскольку ее внедрение не вызовет экономию чернил в картриджах принтеров, расходование бумаги и т.п. В итоге, годовая экономия будет равна экономии, связанной с повышением производительности труда пользователя. Наряду с этим на обработку информации по закупкам требуется определенное время. При введении программы 1С был произведен расчет этого времени (табл. 14).

Экономия времени составляет 48 мин. или 0,8 ч, что можно рационально использовать для выполнения добавившихся должностных функций.

Таким образом, имеем следующие расходы и доходы при совершенствовании закупочной деятельности (табл. 15).

Следовательно, экономический эффект от совершенствования закупочной деятельности будет определен по формуле:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{год}} = \mathcal{D} + \Delta \mathcal{E} - \mathcal{E}_{\text{доп}},$$

где \mathcal{D} – доходы от реализации сопутствующих товаров, полученные за 2021 г.; $\Delta \mathcal{E}$ – общая экономия при выведении работы юриста и сложившейся экономии от расходов на сопутствующие товары; $\mathcal{E}_{\text{доп}}$ – дополнительные затраты, включающие в себя оплату труда инженера и единовременные затраты.

Расчет годового экономического эффекта состоит из общей экономии за вычетом затрат:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{год}} = 60\,000 + 13\,875,76 + 187\,699,2 - 155\,750,4 - 58\,500 = 47\,324,56 \text{ руб. в год.}$$

Заключение

С внедрением предложенной программы организация процедуры закупки позволит избежать выявления факта коррупционной составляющей, что является наиболее актуальным в настоящее время. Внедрение предложенной программы поможет увеличить производительность труда, повысить качество оказания услуг, увеличить оперативность предоставления информации для руководства (план закупок, организация и контроль).

Таблица 14. Расчет времени на обработку информации в день

Table 14. Calculation of processing time per day

Вид работ Type of work	Затраты времени на автоматизацию, мин Time spent on automation, min		Сокращение времени, мин Time reduction, min
	До внедрения Before implementation	После внедрения After implementation	
Ввод информации Information entry	90	70	20
Проведение расчетов Carrying out calculations	5	2	3
Подготовка и печать отчетов Preparing and printing reports	30	15	15
Анализ и выборка данных Data analysis and sampling	45	35	10
Итого Total	–	–	48

Таблица 15. Расходы и доходы, связанные с совершенствованием закупочной деятельности**Table 15.** Expenses and income associated with the improvement of procurement activities

Наименование затрат Naming of expenditures	Сумма, руб. Amount, rub.
Сумма, полученных доходов, всего; Amount of income received, total	261 574,96
В том числе: экономия расходов на закупку сопутствующих товаров Including: savings in the cost of purchasing related products	13 875,76
доходы от реализации сопутствующих товаров income from the sale of related products	60 000
Оплата услуг юрисконсульта Payment for legal services	187 699,2
Расходы, всего Total expenditures	214 250,4
В том числе: стоимость программы 1С Including: the cost of the program 1С	35 000
годовая лицензия программы annual software license	7 500
обучение инженера программе 1С (прохождение курсов) 1С engineer training (courses)	16 000
оплата труда инженера engineer salary	155 750,4

Список литературы

1. Гужина Г.Н., Кожаяв Ю.П. Методы управления товарным ассортиментом // Инновации и инвестиции. 2015. № 2. С. 88–90.
2. Савицкая Г.В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия. М. : ИНФРА-М, 2023. 378 с.
3. Хамлова О. ABC-анализ: методика проведения // Управление компанией. 2006. № 10. URL : <https://www.cfin.ru/press/zhuk/2006-10/6.shtml> (Дата обращения: 12.11.2022).
4. Коноховский П.В. Математические методы исследования операций в экономике. СПб. : Питер, 2002. 207 с.
5. Бузукова Е.А. Анализ ассортимента и стабильности продаж с использованием ABC-анализа и XYZ-анализа // Управление продажами. 2006. № 3. С. 166–185.
6. Стерлигова А.Н. Управление запасами широкой номенклатуры: с чего начать? // ЛогИнфо. 2003. №1. С. 50–55. URL : <https://www.hse.ru/data/391/032/1239/ABC-XYZ%20-%20для%20Логинфо.pdf> (Дата обращения: 12.11.2022).
7. Дюженкова Н.В., Ивлиев А.А. Использование ABC и XYZ анализа в процессе управления ассортиментом производственного предприятия // Вестник научных конференций. 2015. № 1-6 (1). С. 42–51.
8. Конигов А.И., Конигов Г.А. Расширение функциональных возможностей анализа ABC- XYZ // Логистика и управление цепями поставок. 2014. № 3 (62). С. 54–57.
9. Репникова В.В. О некоторых особенностях управления ассортиментом с учетом результатов ABC-анализа // Модернизация российской экономики: перспективы, парадигмы, решения : сб. науч. ст. Новосибирск, 2014. С. 241–243.
10. Бабаев С. Управление закупками и продажами // Российская торговля. 2005. № 5-6. С. 28–29.
11. Тюхтина А.А. Модели управления запасами. Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2017. 84 с.
12. Хедли Дж., Уайтин Т. Анализ систем управления запасами. М. : Наука, 1969. 511 с.
13. Шрайбфедер Д. Эффективное управление запасами. М. : Альпина Бизнес Букс, 2006. 304 с.
14. Ласковец С.В., Каптюхин Р.В., Жидкова О.Н. Применение методов анализа ассортимента в целях совершенствования товарной политики компании // Бизнес. Образование. Право. Вестник Волгоградского института бизнеса. 2014. № 2 (27). С. 141–145.
15. Линдерс М.Р., Фирон Х.Е. Управление снабжением и запасами. Логистика. СПб. : Виктория Плюс, 2006. 768 с.
16. Татарнинова Е.Д., Наумов А.А., Баженов Р.И. Совершенствование ассортимента продажи товаров на основе ABC-XYZ-анализа // Экономика и менеджмент инновационных технологий. 2015. № 2 (41). С. 112–122.
17. Григорьева Н.Н., Косиченко М.А. Анализ работы вокзала Иркутск-Пассажирский и перспективы его развития // Наука сегодня: вызовы и решения : сб. тр. междунар. науч.-практ. конфер. Вологда, 2019. С. 53–54.
18. Елкин С.Е. Вопросы теории управления товарным ассортиментом // Сибирский торгово-экономический журнал. 2009. № 9. С. 48–55.
19. Дихтль Е., Хершген Х. Практический маркетинг. М. : Инфра-М ; Высш. шк., 1996. 254 с.
20. О порядке закупки товаров, работ, услуг для нужд ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» от 12.07.2018 №1481/р (ред. 14.02.2023). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.

References

1. Guzhina G.N., Kozhaev Yu.P. Metody upravleniya tovarnym assortimentom [Methods of product assortment management]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments], 2015, no. 2, pp. 88–90.
2. Savitskaya G.V. Analiz khozyaistvennoi deyatel'nosti predpriyatiya [Analysis of economic activity of the enterprise]. Moscow: INFRA-M Publ., 2023. 378 p.
3. Khamlova O. ABC-analiz: metodika provedeniya [ABC-analysis: methodology of conducting]. *Upravlenie kompaniei* [Company management], 2006, no. 10. Available at: <https://www.cfin.ru/press/zhuk/2006-10/6.shtml> (Accessed November 12, 2022).
4. Konyukhovskii P.V. Matematicheskie metody issledovaniya operatsii v ekonomike [Mathematical methods of operations research in economics]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2002. 207 p.
5. Buzukova E.A. Analiz assortimenta i stabil'nosti prodazh s ispol'zovaniem ABC-analiza i XYZ-analiza [Analysis of assortment and sales stability using ABC-analysis and XYZ-analysis]. *Upravlenie prodazhami* [Sales management], 2006, no. 3, pp. 166–185.
6. Sterligova A.N. Upravlenie zapasami shirokoi nomenklatury: s chego nachat' [Inventory management of a wide range: where to start?]. *LogInfo* [LogInfo], 2003, no. 12, pp. 50–55. Available at: <https://www.hse.ru/data/391/032/1239/ABC-XYZ%20-%20для%20Логинфо.pdf> (Accessed November 12, 2022).
7. Dyuzhenkova N.V., Ivliev A.A. Ispol'zovanie ABC i XYZ analiza v protsesse upravleniya assortimentom proizvodstvennogo predpriyatiya [The use of ABC and XYZ analysis in the process of managing the assortment of a manufacturing enterprise]. *Vestnik nauchnykh konferentsii* [Bulletin of scientific conferences], 2015, no. 1-6 (1), pp. 42–51.
8. Konikov A.I., Konikov G.A. Rasshirenie funktsional'nykh vozmozhnostei analiza ABC-XYZ [Extending the functionality of ABC-XYZ analysis]. *Logistika i upravlenie tseyami postavok* [Logistics and Supply chain management], 2014, no. 3 (62), pp. 54–57.
9. Repnikova V.V. O nekotorykh osobennostyakh upravleniya assortimentom s uchetoм rezul'tatov ABC-analiza [About some features of assortment management taking into account the results of ABC analysis]. *Sbornik nauchnykh statei «Modernizatsiya rossiiskoi ekonomiki: perspektivy, paradigmy, resheniya»* [Proceedings «Modernization of the Russian economy: prospects, paradigms, solutions»]. Novosibirsk, 2014, pp. 241–243.
10. Babaev S. Upravlenie zakupkami i prodazhami [Purchasing and sales management]. *Rossiiskaya trgovlya* [Russian trade], 2005, no. 5-6, pp. 28–29.
11. Tyukhtina A.A. Modeli upravleniya zapasami [Inventory management models]. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gos. Universitet Publ., 2017. 84 p.
12. Hadley G., Whitin T.M. Analiz sistem upravleniya zapasami [Analysis of inventory systems]. Moscow: Nauka Publ., 1969. 511 p.
13. Schreibfeder J. Effektivnoe upravlenie zapasami [Achieving Effective Inventory Management]. Moscow: Al'pina Biznes Buks Publ., 2006. 304 p.
14. Laskovets S.V., Kaptyukhin R.V., Zhidkova O.N. Primenenie metodov analiza assortimenta v tselyakh sovershenstvovaniya tovarnoi politiki kompanii [Application of assortment analysis methods in order to improve the company's product policy]. *Biznes. Obrazovanie. Pravo. Vestnik Volgogradskogo instituta biznesa* [Business. Education. Right. Bulletin of the Volgograd Institute of Business], 2014, no. 2 (27), pp. 141–145.
15. Linders M.R., Fearon H.E. Upravlenie snabzheniem i zapasami. Logistika [Purchasing and Supply Management. Logistics]. Saint Petersburg: Viktoriya plus Publ., 2006. 768 p.
16. Tatarinova E.D., Naumov A.A., Bazhenov R.I. Sovershenstvovanie assortimenta prodazhi tovarov na osnove ABC-XYZ-analiza [Improving the product range based on ABC-XYZ analysis]. *Ekonomika i menedzhment innovatsionnykh tekhnologii* [Economics and management of innovative technologies], 2015, no. 2 (41), pp. 112–122.
17. Grigor'eva N.N., Kosichenko M.A. Analiz raboty vokzala Irkutsk-Passazhirskii i perspektivy ego razvitiya [Analysis of the Irkutsk-Passenger railway station and its development prospects]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii « Nauka segodnya: vyzovy i resheniya »* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Science of this Day: Challenges and solutions»]. Vologda, 2019, pp. 53–54.
18. Elkin S.E. Voprosy teorii upravleniya tovarnym assortimentom [Questions of the theory of commodity assortment management]. *Sibirskii torgovo-ekonomicheskii zhurnal* [Siberian Trade and Economic Journal], 2009, no. 9, pp. 48–55.
19. Dichtl E., Hershgen H. Prakticheskii marketing [Practical marketing]. Moscow: Vysshaya shkola: INFRA-M Publ., 1996. 254 p.
20. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 12.07.2018 №1481/r (red. 14.02.2023) «O poryadke zakupki tovarov, rabot, uslug dlya nuzhd OAO «RZhD» [Order of JSC «Russian Railways» dated July 12, 2018 No 1481/r (ed. February 14, 2023) «On the procedure for the purchase of goods, works, services for the needs of JSC «Russian Railways»].

Информация об авторах

Григорьева Наталья Николаевна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики и управления на железнодорожном транспорте, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: zolotkina@mail.ru.

Черняева Татьяна Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: chetn2021@yandex.ru.

Information about the authors

Natal'ya N Grigor'eva, Ph.D. in Economic Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics and Management in Railway Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: zolotkina@mail.ru.

Tat'yana N Chernyaeva, Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: chetn2021@yandex.ru.

Повышение качества планирования и организации работ по текущему содержанию железнодорожного пути

Т.Н. Асалханова¹✉, А.А. Осколков²

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

²Восточно-Сибирская дирекция инфраструктуры – структурное подразделение Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», г. Иркутск, Российская Федерация

✉asalk-tatyana@yandex.ru

Резюме

В статье рассматриваются вопросы, возникающие при планировании и организации работ по текущему содержанию железнодорожного пути. В Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом до 2035 г. уделяется значительное внимание обстановке на объектах железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона. В настоящее время существуют проблемы по содержанию железнодорожного полотна, так как выявлено неудовлетворительное состояние достаточно большого количества участков пути на полигоне, что приводит к снижению скорости транспортировки грузов. Данное обстоятельство ограничивает возможности по транзитным и экспортным направлениям перевозок железнодорожным транспортом, ведет к потере клиентов и, следовательно, к уменьшению доходов компании. Транспортная стратегия предполагает модернизацию железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей, что накладывает большую ответственность на путевое хозяйство. Ежегодное увеличение грузооборота, веса подвижного состава, участковой скорости приводит к снижению временных интервалов для проведения технического обслуживания пути, соответственно, это отрицательно сказывается на состоянии железнодорожного полотна. На примере путевого хозяйства Восточно-Сибирской железной дороги проведен сравнительный анализ по данным Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой по планированию и фактическому выполнению работ по текущему содержанию пути. Результаты исследований показывают, что наблюдается увеличение участков железнодорожного пути с пропущенным тоннажем, при этом отмечается сокращение объемов капитального ремонта. Также выявлены факторы, которые мешают повысить качество планирования и организации работ, включая влияние человека на ввод, обработку информации в Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой, принятие неверных управленческих решений. Современное состояние цифровых технологий позволяет перейти на новый уровень автоматизации процессов планирования и организации путевых работ, что повысит качество этих процессов.

Ключевые слова

автоматизированная система управления ВИМ, Единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой, железнодорожный путь, искусственный интеллект, организация и планирование путевых работ, информационное моделирование процессов, техническое содержание, цифровые технологии

Для цитирования

Асалханова Т.Н. Повышение качества планирования и организации работ по текущему содержанию пути / Т.Н. Асалханова, А.А. Осколков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 73–82. DOI 10.26731/1813-9108.2023.(77).73-82.

Информация о статье

поступила в редакцию: 16.11.2022 г.; поступила после рецензирования: 9.03.2023 г.; принята к публикации: 10.03.2023 г.

Improving the quality of planning and organization of work on the current railway track maintenance

T.N. Asalkhanova¹✉, A.A. Oskolkov²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²The East-Siberian infrastructure Directorate – structural subdivision of the Central Directorate of Infrastructure – branch of JSC «Russian Railways», Irkutsk, the Russian Federation

✉asalk-tatyana@yandex.ru

Abstract

The article discusses the issues that arise when planning and organizing work on the current maintenance of the railway track. In the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast until 2035, much attention is paid to the situation at the railway infrastructure facilities of the Eastern Polygon. Currently, there are problems with the maintenance of the railway track, as the unsatisfactory condition of a sufficiently large number of sections of track at the polygon has been revealed, which

leads to a decrease in the speed of cargo transportation. This circumstance limits the possibilities for transit and export routes of rail transportation, hence the loss of customers leading to a decrease in the company's income. The strategy includes modernization of the railway infrastructure of the Baikal-Amur and Trans-Siberian railway with the development of throughput and carrying capacity, which imposes a great responsibility on the track economy. The annual increase in cargo turnover, weight of rolling stock and section speed leads to a decrease in time intervals for track maintenance which leads to a deterioration in the condition of the railway track. On the example of track economy of the East Siberian Railway, a comparative analysis was carried out based on the data of the Unified corporate automated infrastructure management system for planning and actual performance of work on the current maintenance of the track. The results of the research show that there is an increase in sections of railway track with missed tonnage, while there is a reduction in the volume of capital repairs. The factors that do not allow to improve the quality of planning and organization of work are also revealed, including the human influence on the input and processing of information into the Unified corporate automated infrastructure management system as well as making incorrect management decisions. The current state of digital technologies allows to move to a new level of automation of planning processes and the organization of track works, which will improve the quality of these processes.

Keywords

automated control system BIM, Unified corporate automated infrastructure management system, railway track, artificial intelligence, organization and planning of travel work, information modeling of processes, technical content, digital technologies

For citation

Asalkhanova T.N., Oskolkov A.A. Povyshenie kachestva planirovaniya i organizatsii работ по tekushchemu soderzhaniyu zheleznodorozhnogo puti [Improving the quality of planning and organization of work on the current railway track maintenance]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 73–82. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).73-82.

Article info

Received: November 16, 2022; Revised: March 9, 2023; Accepted: March 10, 2023.

Введение

Развитие холдинга ОАО «РЖД» до 2030 г. с прогнозом до 2035 г. предусматривает существенное расширение тяжеловесного движения по дорогам Восточного полигона. При этом в стратегии развития указано, что повышение напряженности движения поездов уменьшает плановое время на текущее содержание и ремонт железнодорожного пути. Следовательно, нарастает дефектность элементов верхнего строения пути, увеличивается количество отказов технических средств, что приводит к увеличению трудоемкости работ по обслуживанию и

ремонту пути, а также к снижению скорости доставки грузов и пассажиров [1].

Планирование текущего содержания железнодорожного пути формируется в соответствии с нормативными документами: Правила технической эксплуатации, утвержденные приказом Минтранса России от 23 июня 2022 г. № 250; распоряжениями ОАО «РЖД» «Об утверждении Положения об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений» от 29 ноября 2019 г. № 2675/р и «Об утверждении Правил назначения ремонтов железнодорожного пути» от 17 декабря



Рис. 1. Схема планирования работ по текущему содержанию пути

Fig. 1. Scheme of work planning for the current content of the track

2021 г. № 2888; Руководство по комплексной оценке состояния пути от 20 января 2012 г. № 72/р; Положение о проведении генерального весеннего и осеннего осмотров пути и сооружений от 5 сентября 2018 г. № 1961/р; Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути от 14 декабря 2016 г. № 2544/р; Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути от 14 ноября 2016 г. № 2288/р [1–8]. Планирование работ можно представить в виде схемы (рис. 1).

Всесторонне объемы и составы планово-предупредительных работ, внедрение цифровых двойников в процесс планирования и организации работ рассмотрены такими учеными, как В.П. Бельтюков, Д.В. Величко, А.С. Гапоненко, Н.И. Коваленко, А.А. Севостьянов, О.А. Суслов, В.О. Певзнер и др. [9–21]. Тем не менее до сих пор планирование путевых работ находится не на том уровне, чтобы говорить об эффективности этого процесса.

Планирование текущего содержания железнодорожного пути

Обязательным условием при планировании работ по текущему содержанию пути (годовом, месячном, недельном, суточном) является анализ данных из различных систем – Единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктуры (ЕК АСУИ); Комплексная автоматизированная система учета,

расследования и анализа случаев технологических нарушений (КАСАТ) / Комплексная автоматизированная система учета, контроля устранения отказов технических средств (КАС АНТ); Единая корпоративная автоматизированная система управления трудовыми ресурсами (ЕК АСУТР); Единая корпоративная автоматизированная система управления финансами и ресурсами (ЕК АСУФР). Для анализа формируются отчеты по результатам осмотров пути, общей оценки состояния пути на перспективу, наличия нормативно-целевого бюджета на будущий период. Анализ интенсивности износа элементов верхнего строения пути, выбор приоритетных участков строится согласно полученной информации со средств диагностики и мониторинга, визуального контроля, зафиксированным инцидентам за предыдущий период, выполненным рабочим заданиям [1, 3–6, 8].

Оценка планирования и выполнения работ по Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры (ВС ДИ) по данным ЕК АСУИ выявила следующее: с 2020 г. планирование рабочих заданий (РЗ) до начала работ стало возрастать, а заполнение РЗ после выполнения – снижаться, что говорит о более вдумчивом отношении к планированию. Но некоторые дистанции все-таки заполняют РЗ значительно позже их выполнения (рис. 2, 3).

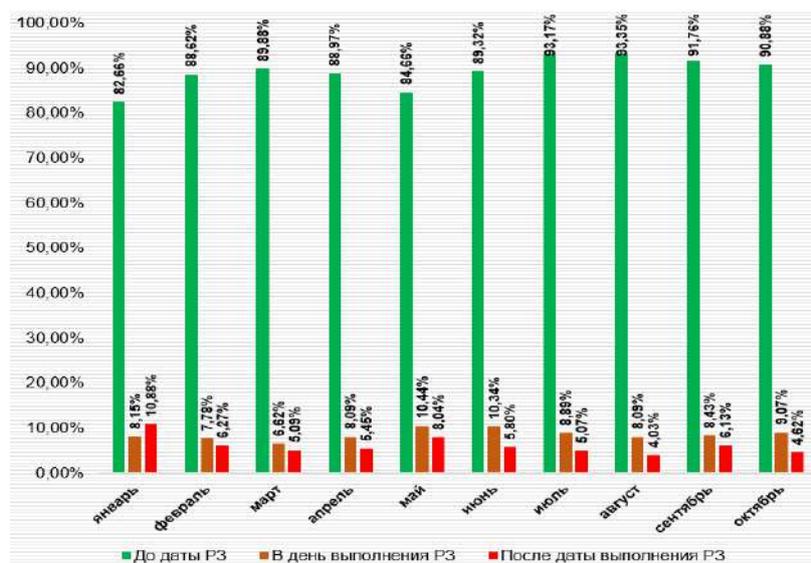


Рис. 2. Сравнительный анализ планирования путевых работ по Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры за 2022 г.

Fig. 2. Comparative analysis of the planning of track work on the East-Siberian infrastructure Directorate for 2022

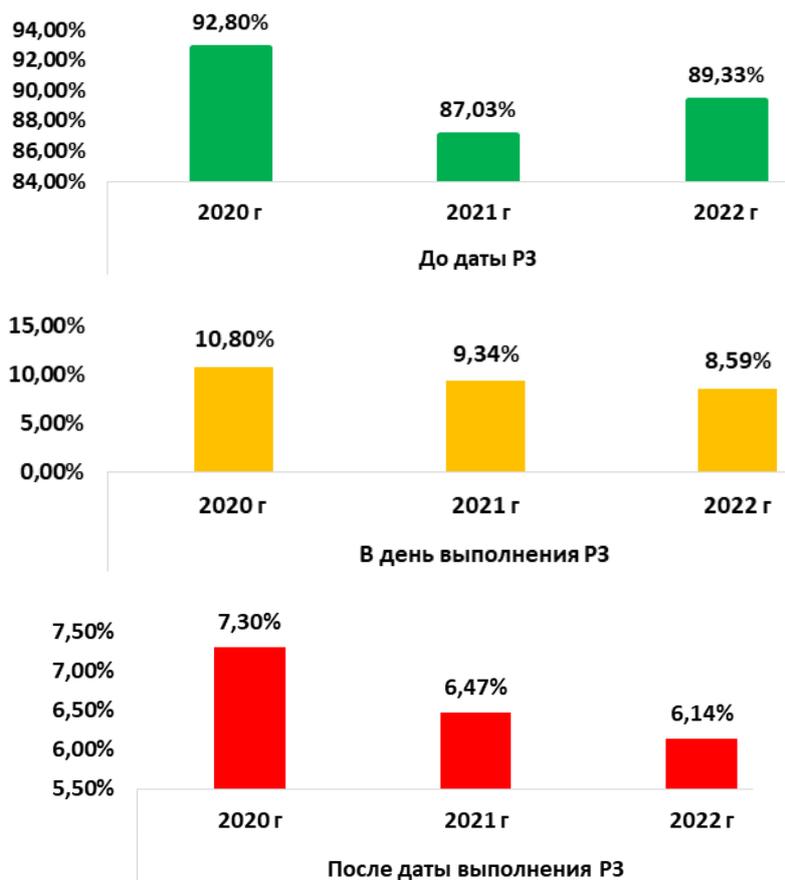


Рис. 3. Сравнительный анализ планирования путевых работ по Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры за 2020–2022 гг.
Fig. 3. Comparative analysis of the track work planning

Выполнение работ по текущему содержанию пути

С 2020 г. наблюдается снижение трудозатрат на выполнение работ по эксплуатации, т.е. на работы по текущему содержанию пути. При этом фиксируется повышение трудозатрат на прочие и сопутствующие работы. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что некоторые выполняемые работы заносятся в систему с нарушениями по выбору технологонормировочных карт (ТНК) или отсутствию отдельных ТНК, что приводит к возрастанию прочих и остальных работ, которые трудно идентифицировать в системе и выявить, какие конкретные работы выполнены на участках (рис. 4).

За последние пять лет в ЕК АСУИ фиксируется повышение количества инцидентов по неисправностям элементов верхнего строения пути, которые выявляются в периоды различных видов осмотров, в том числе генеральных осмотров. За этот же период наблюдается еще одна негативная тенденция – это рост числа

перекосов пути, что может создавать опасность при движении подвижного состава, особенно в условиях повышения грузонапряженности на Восточно-Сибирской железной дороге, которая входит в Восточный полигон (рис. 5).

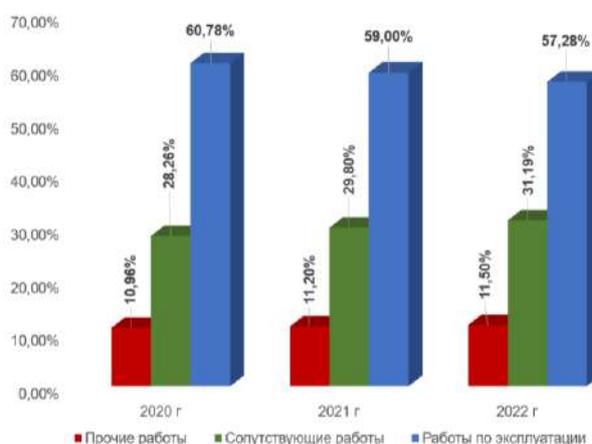


Рис. 4. Анализ фактически выполненных работ
Fig. 4. Analysis of actually performed operations

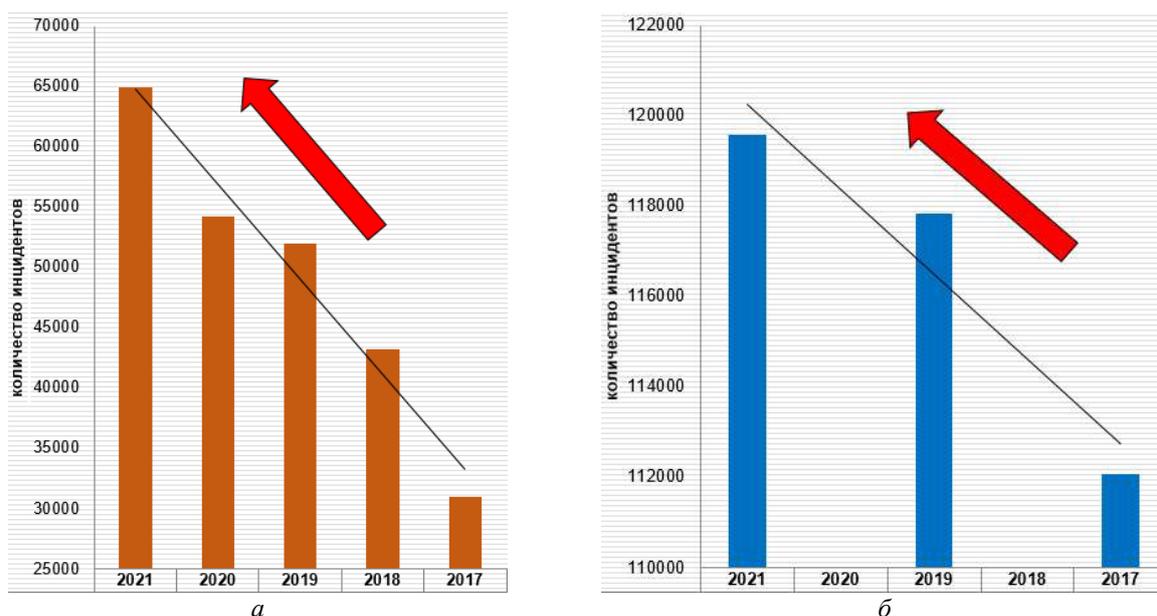


Рис. 5. Анализ неисправностей и перекосов пути по результатам генеральных осмотров и средств дефектоскопии с 2017 по 2021 гг.:

a – рост неисправностей пути при генеральном осмотре;

б – рост числа перекосов пути, выявленных средствами диагностики

Fig. 5. Analysis of track malfunctions and distortions based on the results of general inspections and flaw detection tools from 2017 to 2021:

a – the growth of track malfunctions during a general inspection;

b – an increase in the number of path distortions detected by diagnostic tools

По данным системы ЕК АСУТР с 2011 г. по текущий год численность монтеров пути по дирекции снизилась более чем на 10 %, а количество инцидентов (особенно первоочередных и неотложных) и РЗ значительно увеличилось. В то же время наблюдается отвлечение монтеров пути на выполнение других обязанностей – замещение водителя, механизатора ХДВ, бригадира пути, оператора дефектоскопной тележки и др. Данное обстоятельство приводит к несоблюдению сроков выполнения или к откладыванию плановых работ на другие периоды, что также не способствует улучшению состояния железнодорожного пути, увеличению количества участков с просроченным тоннажем и сокращением объемов капитального ремонта (рис. 6).

Факторы, влияющие на эффективность планирования и организацию путевых работ

В результате анализа планирования и выполнения работ по текущему содержанию пути выявлены факторы, которые влияют на эффективность данных процессов. Эти факторы можно разделить по группам.

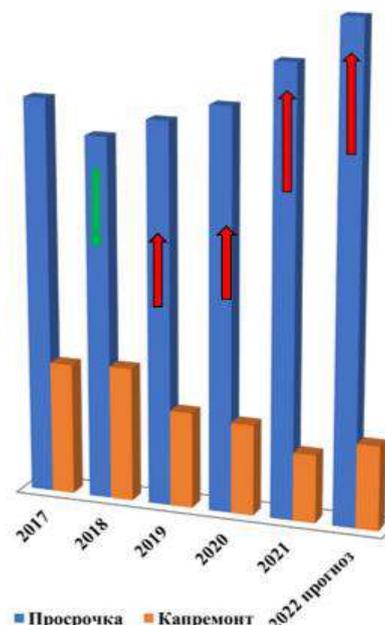


Рис. 6. Участки Восточно-Сибирской железной дороги с просроченным тоннажем и сокращением объемов капитального ремонта

Fig. 6. Sections of the East-Siberian Railway with overdue tonnage and a reduction in the volume of capital repairs

Анализируя фактическое выполнение месячного плана по дирекции, можно сказать, что в настоящее время процент реализации плана невысокий (в некоторых месяцах менее 20 %), что говорит о некорректном планировании. Плановые объемы работ включаются без детальной проработки конкретных условий эксплуатации, а сроки выполнения работ регламентируются лишь степенью влияния каждого отступления от нормативных параметров.

Действующая методика планирования и организации текущего содержания не предусматривает средств поддержки принятия решений в распределении трудовых ресурсов (производственного персонала линейного участка), построения предварительной информационной модели, что приводит к сложностям у руководителей дистанции при организации работ. Например, с сентября текущего года в дистанции пути ВС ДИ на одном из участков зафиксировано в системе за один день 97 инцидентов, которые должны устранить монтеры пути в количестве 21 чел. Из них 6 монтеров пути на дату исполнения отсутствовали по законным причинам, 5 совмещали свою работу с исполнением обязанностей по другим профессиям. Фактически работу выполняли 10 монтеров. При этом инциденты относились в основном к первоочередным.

В настоящее время на качество планирования и организацию путевых работ влияет много факторов, в том числе и существующие методики планирования, премирования, выполнения ключевых показателей (гонка за показателями в ущерб качеству планирования), которые приводят дистанции пути к «подгонке» некоторых результатов. Кроме того, до сих пор не устранены существенные недоработки системы ЕК АСУИ, которые тоже влияют на планирование и организацию работ.

Все выявленные факторы позволяют говорить о том, что необходим пересмотр методики планирования и учета фактически выполняемых работ, а также более полной интеграции данных из разных систем. Следовательно, необходимо внедрение новых подходов и технологий, позволяющих перейти на планирование и организацию работ без предвзятого отношения работников.

Предложения по повышению качества планирования и организации путевых работ

Огромное количество информации, которая накопилась в корпоративных информационных системах ЕК АСУТР, ЕК АСУФР, ЕК АСУИ, КСПД ИЖТ и других системах по объектам инфраструктуры позволяет перейти на другой уровень визуализации – это построение цифровой информационной модели [16, 18].

Цифровая трансформация холдинга включает в себя развитие экосистемы «Умная инфраструктура», что даст возможность объединить корпоративные информационные системы, в том числе Единую корпоративную платформу технической документации (ЕКП ТД), АСУ ВМ, цифрового двойника инфраструктуры (ЦД), ЕК АСУИ [8, 16, 17].

Автоматизированная система управления информационным моделированием (АСУ ВМ) предназначена для построения полного жизненного цикла объектов инфраструктуры холдинга (рис. 7).



Рис. 7. Автоматизированная система управления жизненным циклом объектов инфраструктуры ВМ
Fig. 7. Automated control system BIM – life cycle object management of infrastructure facilities

Данная система позволит вести цифровой мониторинг объектов инфраструктуры, их состояния, отслеживать все этапы эксплуатации, управлять ресурсами, планировать производственные процессы, прогнозировать состояние.

В настоящее время цифровые двойники объектов инфраструктуры строятся на основе данных технической документации, оперативных данных со средств диагностики и мониторинга, которые накапливаются в системе ЕК АСУИ СДМИ. Цифровые двойники будут

содержать действительную информацию о состоянии объекта, а также рисков, которые могут возникнуть в случаях невыполнения плано-предупредительных работ.

Таким образом, экосистема «Умная инфраструктура» предполагает объединение физических объектов с цифровой инфраструктурой, что влечет за собой внедрение практически всех сквозных цифровых технологий. Это позволит поднять качество планирования и организации путевых работ [8].

Для развития экосистемы предлагаем повысить эффективность использования системы ЕК АСУИ за счет внедрения искусственного интеллекта (ИИ), что позволит отойти от влияния человеческого фактора на ввод информации в систему, обработку ее и принятие управленческих решений. Концепция внедрения ИИ в ОАО «РЖД» позволяет перейти на данную технологию [16]. Сформировать новое интеллектуальное планирование и организацию работ, получать в системе адекватную аналитику и прогноз состояния пути с помощью визуализации, построения целевой имитационной модели. Современное состояние внедрения цифровой трансформации железнодорожного транспорта позволяет говорить о том, что интеллектуальное планирование возможно и доступно для внедрения (рис. 8) [22].

В соответствии со стратегией развития

холдинга моделью цифровой железной дороги сфера «Управление инфраструктурой» разделена на следующие зоны [23]:

- учет объектов;
- текущее содержание и диагностика;
- ремонты инфраструктуры;
- реконструкция инфраструктуры;
- управление рисками и ресурсами.

Разделение позволяет разрабатывать новые математические модели в существующих информационных системах, интегрировать системы в единую систему управления железнодорожным транспортом и комплексно решать проблемы, возникающие при планировании и организации работ по обслуживанию железнодорожного пути.

Для этих целей в ЕК АСУИ должны быть встроены математические и информационные модели процессов путевого хозяйства: прогноз состояния и развития дефектов на конкретных участках пути на основе реальных данных со средств диагностики и мониторинга и анализа инцидентов; построение визуальной модели элементов пути с предлагаемыми технологическими процессами с учетом местных условий эксплуатации и наличием ресурсов (трудовых и материальных); расчет объемов работ, необходимого контингента, инструмента; сигнализация руководителей работ об отвлечении монтажников пути на выполнение работ, не связанных с



Рис. 8. Модель цифровой трансформации в ОАО «РЖД»
Fig. 8. The model of digital transformation in JSC «Russian Railways»

технологическими процессами (в том числе на работы сигнальщиков). В дальнейшем такие модели позволят производить расчет нормативной численности монтеров пути в системе ЕК АСУТР не только на основе паспорта дистанции, а на качественном реальном расчете объемов работ в зависимости от состояния пути и грузонапряженности на участках пути [8].

Грамотное планирование и организация действий по устранению выявленных неисправностей обеспечивает безопасность движения, а выполнение планово-предупредительных работ снижает риски возникновения отказов элементов пути [5].

Заключение

Используя предложенную модель планирования и организации путевых работ, можно разработать методику планирования путевых работ с учетом наибольшего количества показате-

лей и факторов, которые влияют на изменение элементов пути.

Такая модель планирования должна выстраиваться с учетом внедрения цифровых технологий, в том числе и технологий ИИ, ВМ, машинного обучения, предиктивной аналитики, больших данных, блокчейна и др.

Модель должна содержать комплексное планирование путевых работ с учетом состояния всех объектов инфраструктуры, материальных и трудовых ресурсов, предоставления технологических «окон» для проведения различных работ по обслуживанию или ремонту инфраструктуры. В результате такого планирования изменится и подход к организации работ совместно со всеми причастными хозяйствами, что повысит эффективность работы путевого хозяйства и положительно скажется на перевозочном процессе.

Список литературы

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 № 3363-р // Правительство Рос. Федерации : сайт. URL : <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLI0nUT91RjCbeR.pdf> (Дата обращения 01.10.2022).
2. Об утверждении и введении в действие инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 16.11.2016 г. № 2288р (ред. 02.11.2022). Доступ из справ.-правовой системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
3. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ Минтранса России № 250 от 23.06.2022 // Официальный интернет-портал правовой информации : сайт. URL : <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207200026?index=0&rangeSize=1> (Дата обращения 01.10.2022).
4. Методика прогнозирования износа рельсов различных категорий качества с нормативами интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации : утв. заместителем генерального директора ОАО «РЖД» – начальником Центральной дирекции инфраструктуры 29.09.2022 г. № 1824. Доступ из справ.-правовой системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
5. Об утверждении правил назначения ремонтов железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 17.12.2021 г. № 2888/р (ред. 03.02.2023). Доступ из справ.-правовой системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
6. Об утверждении положения об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений : распоряжение ОАО «РЖД» от 29.11.2019 г. № 2675/р (ред. 6.10.2020). Доступ из справ.-правовой системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
7. Об утверждении и введении в действие положения о системе неразрушающего контроля рельсов и эксплуатации средств рельсовой дефектоскопии в путевом хозяйстве железных дорог ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» от 26.07.2017 г. № 1471р (ред. 05.05.2022). Доступ из справ.-правовой системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
8. Об утверждении паспорта комплексной программы инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года : распоряжение ОАО «РЖД» от 31.08.2022 г. № 2271/р. Доступ из справ.-правовой системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
9. Авсиевич А.В., Овчинников Д.В. Определение напряженно-деформированного состояния элементов железнодорожного пути на основе измерения ускорения и математического моделирования // Вестник транспорта Поволжья. 2022. № 1 (91). С. 34–42.
10. Андреев А.В. Методика определения стоимости жизненного цикла конструкции пути с учетом прогнозирования технического состояния пути // Путь XXI века : сб. науч. трудов междунар. науч.-метод. конф. СПб., 2013. С. 188–193.
11. Бельтюков В.П. Стратегия технического обслуживания и ремонтов железнодорожного пути // Инновационные методы управления техническим обслуживанием железнодорожного пути : сб. тр. науч.-практ. семинара. СПб., 2022. С. 5–12.
12. Величко Д.В., Севостьянов А.А., Антерейкин Е.С. Оценка надежности рельсов на участках Транссибирской магистрали // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2019. № 1 (48). С. 5–11.
13. Гапоненко А.С., Бушуев М.В. Подходы в планировании планово-предупредительной выправки и оценка состояния пути // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 1 С. 7–16.
14. Глубоков Н.Н., Мироненко Е.В. Система «Электронное путевое хозяйство» // Тр. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2019. № 3. С. 30–34.

15. Коваленко Н.И., Суворова Д.Р., Аноховская И.В. Применение системы ЕК АСУИ при планировании работ путевого хозяйства ОАО «РЖД» // Наука и технологии железных дорог. 2020. Т. 4. № 1 (13). С. 78–87.
16. Об утверждении концепции применения искусственного интеллекта в ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 14.02.2022 г. № 334/р. Доступ из справ.-правовой системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
17. BIM на железных дорогах мира – развитие, примеры, стандарты. / В.П. Куприяновский, О.Н. Покусаев, А.А. Климов и др. // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Vol. 8. № 5. P. 57–80.
18. Павловский А.А., Озеров А.В., Куроптева А.П. К концепции внедрения информационного моделирования в железнодорожном транспортном комплексе // Наука и технологии железных дорог. 2022. Т. 6. № 3 (23). С. 20–31.
19. Севостьянов А.А., Величко Д.В. Повышение эффективности технологического процесса планово-предупредительной выправки железнодорожного пути // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2021. № 4 (59). С. 37–46.
20. Суслов О.А., Федорова В.И. Перспективные подходы к прогнозному моделированию деградационных процессов элементов верхнего строения пути и их применение при создании цифровых двойников // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2021. Т. 80. № 5. С. 251–259.
21. Суслов О.А. Прогнозная модель расчета накопления неисправностей элементов верхнего строения пути и геометрии рельсовой колеи // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 245–250.
22. Ковальчук А.С., Коваль С.И. Применение цифровых технологий и сервисов для развития железнодорожной инфраструктуры // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 50. С. 476–481.
23. Поздеева А.Ю., Пиатрович А.А. Применение высокоуровневой функциональной модели цифровой железной дороги при определении целевого уровня цифровой зрелости инфраструктуры // Науч.-техн. и эконом. сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2021. Т. 1. С. 488–494.

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 №3363-r «Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Order of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLlOnUT91RjCbeR.pdf> (Accessed October 1, 2022).
2. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» ot 16.11.2016 g. № 2288r (red. 02.11.2022) «Ob utverzhenii i vvedenii v deistvie instruktsii po tekushchemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti» [Order of JSC «Russian Railways» dated November 16, 2016 No 2288r «On the approval and implementation of the instructions for the current maintenance of the railway track» (ed. November 2, 2022)].
3. Prikaz Mintransa Rossii № 250 ot 23.06.2022 «Ob utverzhenii Pravil tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii» [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No 250 dated June 23, 2022 «On approval of the Rules of Technical Operation of Railways of the Russian Federation»]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207200026?index=0&rangeSize=1> (Accessed October 1, 2022).
4. Metodika prognozirovaniya iznosa rel'sov razlichnykh kategorii kachestva s normativami intensivnosti iznosa rel'sov razlichnykh kategorii kachestva v zavisimosti ot uslovii ekspluatatsii : utv. zamestitelem general'nogo direktora ОАО «RZhD» – nachal'nikom Tsentral'noi direktsii infrastruktury 29.09.2022 g. N 1824. [Methodology for predicting the wear of rails of various quality categories with standards for the intensity of wear of rails of various quality categories depending on operating conditions : approved by the Deputy General Director of JSC «Russian Railways» – Head of the Central Directorate of Infrastructure September 29, 2022 N 1824].
5. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» ot 17.12.2021 g. № 2888/r «Ob utverzhenii pravil naznacheniya remontov zheleznodorozhnogo puti» (red. 03.02.2023) [Order of JSC «Russian Railways» dated December 17, 2021 No 2888/r «On approval of the rules for the appointment of railway track repairs» (ed. February 3, 2023)].
6. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» ot 29.11.2019 g. № 2675/r (red. 6.10.2020) «Ob utverzhenii polozheniya ob organizatsii kompleksnogo obsluzhivaniya ob'ektov infrastruktury khozyaistva puti i sooruzhenii» [Order of JSC «Russian Railways» dated November 29, 2019 No 2675/r «On approval of the regulations on the organization of complex maintenance of infrastructure facilities of the track and structures» (ed. October 6, 2020)].
7. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» ot 26.07.2017 g. № 1471r «Ob utverzhenii i vvedenii v deistvie polozheniya o sisteme nerazrushayushchego kontrolya rel'sov i ekspluatatsii sredstv rel'sovoi defektoskopii v putevom khozyaistve zheleznykh dorog ОАО «RZhD» (red. 05.05.2022) [Order of JSC «Russian Railways» dated July 26, 2017 No 1471r «On the approval and implementation of the regulations on the system of non-destructive testing of rails and the operation of means of rail flaw detection in the track facilities of railways of JSC «Russian Railways» (ed. May 5, 2022)].
8. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» ot 31.08.2022 g. № 2271/r «Ob utverzhenii pasporta kompleksnoi programmy innovatsionnogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda» [Order of JSC «Russian Railways» dated August 31, 2022 No 2271/r «About the approval of the passport of the integrated program of innovative development of the Russian Railways holding for the period up to 2025»]
9. Avsievich A.V., Ovchinnikov D.V. Opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov zheleznodorozhnogo puti na osnove izmereniya uskoreniya i matematicheskogo modelirovaniya [Determination of the stress-strain state of railway track elements based on acceleration measurement and mathematical modeling]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga region], 2022, no. 1 (91), pp. 34–42.
10. Andreev A.V. Metodika opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla konstruksii puti s uchetom prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya puti [Methodology determining the cost of the life cycle of a track structure taking into account the prediction of the technical condition of the track]. *Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii «Put' XXI veka*

» [Proceedings of the International Scientific and Methodological Conference «Track of the XXI century»]. Saint Petersburg, 2013, pp. 188–193.

11. Bel'tyukov V.P. Strategiya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remontov zheleznodorozhnogo puti [Strategy of maintenance and repairs of railway track]. *Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo seminara «Innovatsionnye metody upravleniya tekhnicheskim obsluzhivaniem zheleznodorozhnogo puti»* [Proceeding of the International scientific-methodical seminar «Innovative methods of management of maintenance of the railway track»]. Saint Petersburg, 2022, pp. 5–12.

12. Velichko D.V., Sevost'yanov A.A., Antereikin E.S. Otsenka nadezhnosti rel'sov na uchastkakh Transsibirskoi magistrali [Evaluation of the reliability of rails on sections of the Trans-Siberian Railway]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2019, no. 1 (48), pp. 5–11.

13. Gaponenko A.S., Bushuev M.V. Podkhody v planirovanii planovo-predupreditel'noi vypravki i otsenka sostoyaniya puti [Approaches in planning preventive maintenance and assessment of the state of the track]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Petersburg Transport University], 2022, no. 1, pp. 7–16.

14. Glubokov N.N., Mironenko E.V. Sistema «Elektronnoe putevoe khozyaistvo» [The system «Electronic track management»]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University], 2019, no. 3, pp. 30–34.

15. Kovalenko N.I., Suvorova D.R., Anokhovskaya I.V. Primenenie sistemy EK ASUI pri planirovanii rabot putevogo khozyaistva OAO «RZhD» [Application of the unified corporate automated infrastructure management system in the planning of the track facilities of JSC «Russian Railways»]. *Nauka i tekhnologii zheleznikh dorog* [Science and Technology of railways], 2020, vol. 4, no. 1 (13), pp. 78–87.

16. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 14.02.2022 g. № 334/r «Ob utverzhdenii kontseptsii primeneniya iskusstvennogo intellekta v OAO «RZhD» [Order of JSC «Russian Railways» dated February 14, 2022 No 334/r «On the approval of the concept of the use of artificial intelligence in JSC «Russian Railways»].

17. Kupriyanovskii V.P., Pokusaev O.N., Klimov A.A., Dobrynin A.P., Lazutkina V.S., Potapov I.P. [BIM on the railways of the world – development, examples, standards]. *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 8, no. 5, 2020, pp. 57–80.

18. Pavlovskii A.A., Ozerov A.V., Kuropteeva A.P. K kontseptsii vnedreniya informatsionnogo modelirovaniya v zheleznodorozhnom transportnom komplekse [On the concept of implementing information modeling in the railway transport complex]. *Nauka i tekhnologii zheleznikh dorog* [Science and Technology of railways], 2022, vol. 6, no. 3 (23), pp. 20–31.

19. Sevost'yanov A.A., Velichko D.V. Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa planovo-predupreditel'noi vypravki zheleznodorozhnogo puti [Improving the efficiency of the technological process of the planned preventive alignment of the railway track]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2021, no. 4 (59), pp. 37–46.

20. Suslov O.A., Fedorova V.I. Perspektivnye podkhody k prognoznomu modelirovaniyu degradatsionnykh protsessov elementov verkhnego stroeniya puti i ikh primeneniye pri sozdanii tsifrovyykh dvoynikov [Promising approaches to predictive modeling of degradation processes of the elements of the upper structure of the track and their application in the creation of digital doubles]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport], 2021, vol. 80, no. 5, pp. 251–259.

21. Suslov O.A. Prognoznaya model' rascheta nakopleniya neispravnosti elementov verkhnego stroeniya puti i geometrii rel'sovoi kolei [Predictive model for calculating the accumulation of malfunctions of elements of the upper structure of the track and the geometry of the rail gauge]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and education for transport], 2021, no. 2, pp. 245–250.

22. Koval'chuk A.S., Koval' S.I. Primeneniye tsifrovyykh tekhnologii i servisov dlya razvitiya zh/d infrastruktury [Application of digital technologies and services for the development of railway infrastructure]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie* [Innovations. Science. Education], 2022, no. 50, pp. 476–481.

23. Pozdeeva A.Yu., Piatrovich A.A. Primeneniye vysokourovnevoi funktsional'noi modeli tsifrovoi zheleznoi dorogi pri opredelenii tselevogo urovnya tsifrovoi zrelosti infrastruktury [Application of a high-level functional model of a digital railway in determining the target level of digital maturity of infrastructure]. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of the Asian-Pacific region countries in the XXI century], 2021, vol. 1, pp. 488–494.

Информация об авторах

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

Осколков Андрей Александрович, начальник сектора информатизации Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», г. Иркутск; e-mail: di_oskolkovaa@esrr.ru.

Information about the authors

Tat'yana N. Asalkhanova, Ph.D. in Economic Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Track and track facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: asalk-tatyana@yandex.ru.

Andrei A. Oskolkov, Head of the Informatization Sector, the East Siberian Infrastructure Directorate – structural subdivision of the Central Directorate of Infrastructure – branch of JSC «Russian Railways», Irkutsk; e-mail: di_oskolkovaa@esrr.ru.

Моделирование оптимального управления асинхронным приводом

Ю.М. Кулинич, С.А. Шухарев✉, Д.А. Стародубцев

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

✉shuharevsa@gmail.com

Резюме

В настоящее время асинхронные двигатели составляют основу автоматизированного электропривода, на который приходится большая часть потребляемой электроэнергии. В этой связи вопросы рационального расходования энергоресурсов приобретают первостепенное значение. В статье предложен метод оптимального управления асинхронным двигателем по критерию минимизации потребляемого тока. Математическая модель двигателя и его системы управления выполнены методом векторного управления во вращающейся системе координат dq . Исследование предложенного способа управления осуществлено на базе отечественного программного продукта SimInTech компании ООО «3V Сервис». В результате проведенного имитационного моделирования установлена зависимость тока статора двигателя от потокосцепления ротора, имеющая параболическую форму при фиксированных значениях электромагнитного момента. Минимальному значению тока соответствуют оптимальные значения потокосцепления. Такой характер зависимостей послужил основой для использования алгоритма шаговой поисковой системы в разработанной оптимальной системе управления двигателем с минимальным значением потребляемого тока. Разработанная математическая модель асинхронного двигателя управляется оптимальным регулятором, позволяющим уменьшить потребляемый ток до оптимально низких значений при различной величине электромагнитного момента. Представленные в работе результаты исследования свидетельствуют о повышении энергоэффективности асинхронного привода за счет оптимально низкого потребления двигателем тока статора, в связи с этим материалы статьи могут служить теоретической базой при разработке и внедрении энергосберегающих систем управления асинхронным двигателем.

Ключевые слова

асинхронный двигатель, SimInTech, имитационное моделирование, векторное управление двигателем, оптимальная система управления

Для цитирования

Кулинич Ю.М. Моделирование оптимального управления асинхронным приводом / Ю.М. Кулинич, С.А. Шухарев, Д.А. Стародубцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 83–93. DOI 10.26731/1813-9108.2023.(77).83-93.

Информация о статье

поступила в редакцию: 7.12.2022 г.; поступила после рецензирования: 9.03.2023 г.; принята к публикации: 10.03.2023 г.

Simulation of optimum control of asynchronous drive

Yu.M. Kulnich, S.A. Shukharev ✉, D.A. Starodubtsev

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉shuharevsa@gmail.com

Abstract

Currently, asynchronous motors form the basis of an automated electric drive, which accounts for the bulk of the electricity consumed. In this regard, the issues of rational consumption of energy resources are of paramount importance. In the paper under consideration, a method for optimal control of an asynchronous motor according to the criterion of minimizing the consumed current is proposed. The mathematical model of the engine and its control systems are made by the method of vector control in a rotating coordinate system dq . The study of the proposed control method was carried out on the basis of the domestic software product SimInTech of the «3V Service» LLC company. As a result of the simulation modeling, the dependence of the motor stator current on the rotor flux linkage has been established, which has a parabolic shape at fixed values of the electromagnetic torque. The minimum value of the current corresponds to the optimal values of the flux linkage. This nature of the dependences served as the basis for using the step search system algorithm in the developed optimal motor control system with a minimum value of current consumption. The developed mathematical model of an asynchronous motor is controlled by an optimal controller, which makes it possible to reduce the consumed current to optimally low values at different values of the electromagnetic torque. The research results presented in the paper indicate an increase in the energy efficiency of an asynchronous drive due to the optimally low consumption of the stator current by the motor, therefore, the materials of the article can serve as a theoretical basis for the development and implementation of energy-saving control systems for an asynchronous motor.

Keywords

asynchronous motor, SimInTech, simulation modeling, vector control, optimal control

For citation

Kulinich Yu.M., Shukharev S.A., Starodubtsev D.A. Modelirovanie optimal'nogo upravleniya asinkhronnym privodom [Simulation of optimum control of asynchronous drive]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 83–93. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).83-93.

Article Info

Received: December 7, 2022; Revised: March 9, 2023; Accepted: March 10, 2023.

Введение

В настоящее время асинхронный электропривод является самым распространенным из всех типов приводов, применяемым как в промышленности, так и на транспорте. Это обусловлено простотой и надежностью его конструкции, а также достаточно высокими эксплуатационными и энергетическими показателями по сравнению с традиционно применяемыми на подвижном составе тяговыми двигателями пульсирующего тока. Теоретической основой частотного электропривода послужили работы академика М.П. Костенко [1], теоретически обосновавшего три основных закона частотного (скалярного) управления двигателем. В 1971 г. дальнейшим развитием частотного привода послужила работа Ф. Блашке (F. Blaschke) [2], в которой обоснованы принципы векторного управления асинхронным двигателем. Уравнения электромагнитных процессов представлены автором в векторной форме, которые сориентированы по направлению магнитного потока (FOC – Field Oriented Control). Одновременно с этим немецкими и японскими учеными была разработана теория прямого управления моментом асинхронного двигателя [3] (DTC – Direct Torque Control), в которой электромагнитные процессы в двигателе описывались во вращающейся системе координат dq .

Появление технологии производства полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов – IGBT-транзисторов и GTO-тиристоров [4] – способствовало тому, что на подвижном составе стали использоваться принципиально новые типы преобразователей: $4qS$ -преобразователя и трехфазного автономного инвертора напряжения (АИН) [5]. Используемые для их управления цифровые микропроцессорные системы позволили значительно расширить возможности повышения качества регулирования. На сети железных дорог РФ эксплуатируются тепловозы 2ТЭ25А с

асинхронным приводом, выпускаемые Брянским машиностроительным заводом. На полигоне Дальневосточной железной дороги успешно прошли испытания нового электровоза 2ЭС5С с асинхронными тяговыми двигателями. Вместе с тем обеспечение энергетической эффективности асинхронного привода во всем диапазоне токовых нагрузок является нерешенной в полной мере задачей и требует дальнейших исследований.

В настоящее время работы по повышению эффективности асинхронного привода ведутся в двух направлениях: в разработке новых конструкций полупроводниковых преобразователей и тяговых двигателей [6], а также в применении новых энергосберегающих алгоритмов управления по критерию минимизации потерь энергии [7]. Накоплен богатый опыт применения таких установок в системе вентиляции подземных выработок с изменяющейся потребностью шахты в свежем воздухе [8].

Известно, что электрический привод должен обеспечивать заданные значения скорости вращения и момента на валу двигателя. В установившемся режиме он определяется координатами пересечения механических характеристик двигателя и приводного механизма [9]. Оптимальное управление обеспечивает заданный режим работы привода за счет сочетания различных управляющих воздействий:

- частоты и амплитуды питающего напряжения при скалярном управлении;
- проекций тока статора на координатные оси d и q при векторном управлении.

Задача оптимального управления заключается в обеспечении в рабочей точке привода при таких управляющих воздействиях, когда потребляемый двигателем ток и электрические потери имеют минимальные значения [10]. Наибольшее распространение на практике получили алгоритмы управления при минимуме тока статора или максимуме отношения электромагнитного момента к току статора [11].

Для реализации алгоритма оптимального управления [12] используют метод модели потерь, который отличается высоким быстродействием, однако при этом требуется точное аналитическое описание электрических потерь при изменении температуры, нелинейности цепи намагничивания и других параметров двигателя. Более предпочтительным методом является метод поиска минимума потерь в реальном масштабе времени, поскольку он учитывает изменение величины потерь в процессе работы привода.

Теоретической основой энергосберегающих алгоритмов при скалярном управлении асинхронным двигателем являются экстремальный характер зависимостей величины потерь и потребляемого тока от абсолютного скольжения. Установлено, что в системах скалярного управления асинхронным двигателем применение итерационного поиска экстремума абсолютного скольжения позволяет на 10–12 % повысить энергетические показатели привода по сравнению с методом постоянства соотношения напряжение / частота (U/f -регулирование) [12].

Установление закона оптимального управления в аналитическом виде, удобном для реализации в микропроцессорных системах преобразователей частоты, является весьма затруднительным из-за невозможности учета в модели двигателя всех видов электрических потерь, связанных с изменением температуры, насыщением магнитной системы, поверхностного эффекта и др. Изменение параметров двигателя в рабочем диапазоне температур и под действием других факторов приводит к отклонению от оптимального режима и требует коррекции управляющих воздействий на основе фактических данных о реальных параметрах двигателя, для получения которых требуется введение в систему управления адаптивного наблюдателя.

Итеративный (шаговый) метод поиска не требует знания параметров привода, поскольку он основан на методе контроля входного тока асинхронного двигателя и ступенчатом изменении управляющих воздействий до достижения минимальных значений потребляемого тока. Основная задача метода поиска состоит в пошаговом изменении входного управляющего воздействия до достижения оптимально низких значений тока.

Целью данной работы является разработка энергоэффективной системы управления

асинхронным двигателем, основанной на методе итеративного поиска по критерию минимального потребления тока. Предложенная в работе система оптимального управления двигателем исследована методом имитационного моделирования, выполненного в среде программирования SimInTech [13], разработанной отечественными учеными. Полученные результаты моделирования подтвердили правильность принятых схемных решений, свидетельствующих о повышении энергетике электропривода за счет оптимально низкого потребления двигателем тока.

Выбор оптимального значения потокосцепления

Вопрос выбора оптимального значения потокосцепления ротора ψ_R^{opt} во многом определяет энергоэффективность работы асинхронного двигателя. Как правило, при проектировании электрических машин ориентируются на оптимальную величину КПД в номинальном режиме работы двигателя. Если известен номинальный ток двигателя и режим его работы ограничен номинальной нагрузкой, то величина потокосцепления ротора принимается равной ее значению в номинальном режиме.

Если предполагается работа двигателя в режимах, отличных от номинального, то следует обеспечить оптимально выгодный режим работы двигателя по энергетическим критериям. В качестве критерия оптимизации целесообразно использовать минимальный ток двигателя, обеспечивающий близкие к минимуму электрические потери.

Известно, что при некотором значении электромагнитного момента M_{em} ток статора I_S и его проекции I_{sd} , I_{sq} на вращающиеся оси координат dq определяются выражениями:

$$I_{sd} = \psi_R / L_m,$$

$$I_{sq} = \frac{2M_{em}}{3z_p \psi_R^2} \cdot (L_{\sigma R} I_{sd} + \psi_R);$$

$$I_S = \sqrt{I_{sd}^2 + I_{sq}^2}.$$

Согласно этим выражениям [14], рассчитаем значение потокосцепления ротора ψ_R , соответствующее минимальному току статора $I_S \rightarrow \min$ при фиксированной величине электромагнитного момента M_{em} . Если ток статора

минимален, то и выражение для квадрата тока статора также минимально:

$$I_S^2 = \left(\frac{\Psi_R}{L_m} \right)^2 + \left[\frac{2M_{em}}{3z_p \Psi_R} \cdot \left(\frac{L_{\sigma R}}{L_m} + 1 \right) \right]^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

Найдем значение потокосцепления ротора, соответствующее экстремуму тока статора. Для этого вычислим первую производную от квадрата тока статора (1) по потоку и приравняем ее к нулю $dI_S / d\Psi = 0$. После выполнения всех необходимых преобразований находим в аналитическом виде величину потокосцепления, соответствующую минимальному значению тока статора при фиксированном электромагнитном моменте M_{em} [14]:

$$\Psi_R^{opt} = \sqrt{\frac{2M_{em} \cdot (L_{\sigma R} + L_m)}{3z_p}}. \quad (2)$$

В соответствии с выражением (2) для асинхронного двигателя 4A225M4У3 рассчитаны и построены зависимости тока статора I_S от потокосцепления ротора Ψ_R при различных значениях электромагнитного момента $M_{em} = 355 \text{ Н} \cdot \text{м}$ (номинальное значение), $250 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и $150 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Результаты моделирования представлены на рис. 1.

Из анализа рисунка следует, что каждая из полученных зависимостей имеет нелинейный характер с явно выраженными оптимальными значениями потокосцепления Ψ_R^{opt1} –

Ψ_R^{opt3} , которым соответствуют минимальные значения тока статора I_S . Это дает основание при нахождении оптимальных значений потокосцепления Ψ_R^{opt} использовать один из методов шагового поиска.

На рис. 2 показаны зависимости оптимального значения потокосцепления Ψ_R^{opt} от электромагнитного момента M_{em} .

Из анализа рис. 2 следует, что нахождение электромагнитного момента в пределах от $0,5 M_{em_ном}$ до $M_{em_ном}$ соответствует оптимальным значениям потокосцепления от 1,21 до 1,82 Вб, т. е. диапазон изменения потокосцепления составляет 1,5 раза. Это свидетельствует о том, что для достижения минимальных значений тока статора I_S с изменением момента необходимо одновременно корректировать величину потокосцепления. В этой связи разработка оптимальной системы управления двигателем по величине потокосцепления является актуальной задачей.

Разработка системы оптимального регулирования

Для вычисления оптимальных значений потокосцепления Ψ_R^{opt} разработан алгоритм оптимального регулирования, реализованный в блоке оптимального регулирования. В этом блоке в соответствии с текущими значениями

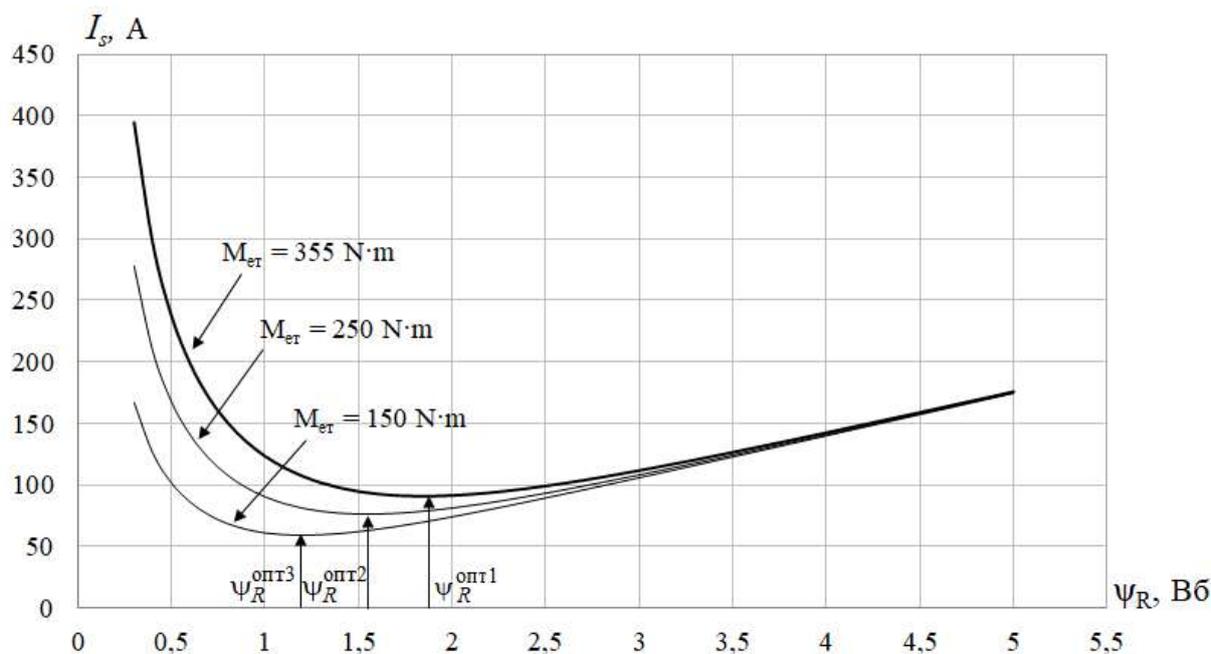


Рис. 1. Зависимости тока статора I_S от потокосцепления ротора Ψ_R

Fig. 1. Dependence of the stator current I_S on the rotor flux linkage Ψ_R

тока статора I_{Si} осуществляется поиск потокосцепления ψ_R в области минимальных значений тока статора. Поиск оптимальных значений потокосцепления ψ_R^{opt} осуществляется путем ступенчатого изменения выходного сигнала блока на величину шага поиска $\Delta\psi$ как в сторону увеличения, так и уменьшения. Схема блока оптимального регулирования, реализованная в пакете программ SimInTech, представлена на рис. 3.

Алгоритм поиска оптимального значения потокосцепления заключается в следующем: сигнал тока статора I_s поступает на вход экстраполятора нулевого порядка $Extr$, который сохраняет на каждом интервале поиска значение тока статора, полученное в конце предыдущего шага поиска. С помощью линии задержки Z_1 и элемента сравнения (ЭС) рассчитывается величина приращения тока статора $\Delta I_S = I_{Si} - I_{S(i-1)}$ на каждом i -ом шаге поиска.

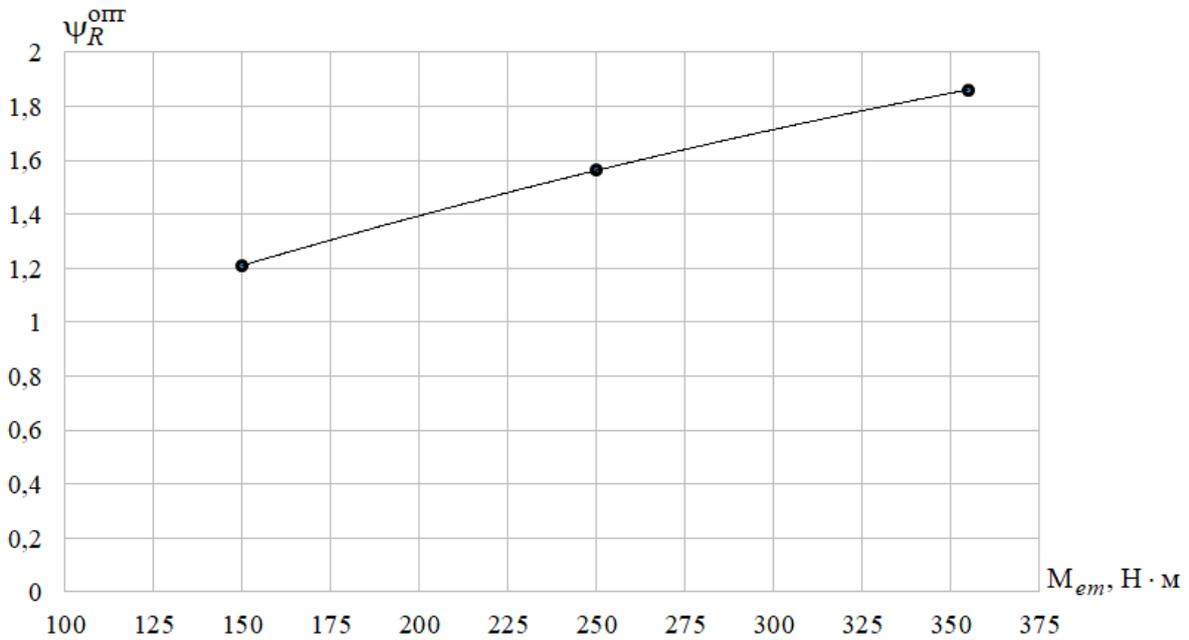


Рис. 2. Зависимость величины оптимального потокосцепления ψ_R^{opt} от электромагнитного момента M_{em}

Fig. 2. Dependence of the value of optimal flux linkage ψ_R^{opt} on the electromagnetic torque M_{em}

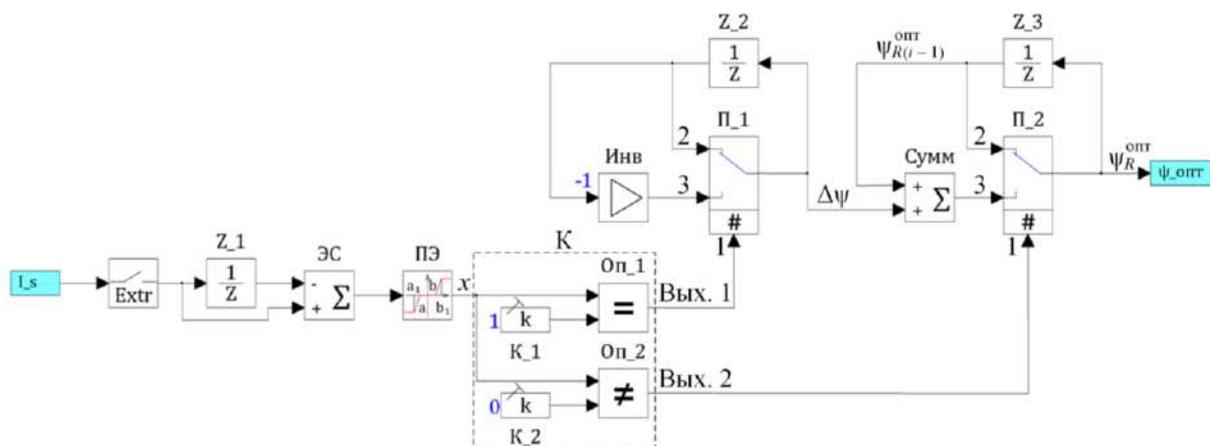


Рис. 3. Схема блока оптимального регулирования: ПЭ – пороговый элемент; ЭС – элемент сравнения

Fig. 3. Scheme of the optimal control block: ПЭ – threshold element; ЭС – comparison element

Пороговый элемент (ПЭ), имеющий три состояния выхода x , определяет режим продолжения или окончания поиска, а также направление поиска оптимального значения потокосцепления $\psi_R^{\text{опт}}$ в соответствии с алгоритмом

$$x = \begin{cases} -1, & \text{если } \Delta I_S < -\delta; \\ 0, & \text{если } -\delta < \Delta I_S < \delta; \\ 1, & \text{если } \Delta I_S > \delta, \end{cases}$$

где δ – величина зоны нечувствительности при вычислении тока статора I_S .

Коммутатор (К) в соответствии с уровнем входного сигнала x определяет знак приращения потокосцепления $\pm \Delta \psi$, а также запускает или останавливает процесс поиска оптимального значения потокосцепления $\psi_R^{\text{опт}}$. Для этого входной сигнал x сравнивается с константами: $K_1 = 1$ на входе первого оператора проверки равенства « \Leftarrow » Оп_1 и с константой $K_2 = 0$ на входе второго оператора неравенства « \neq » Оп_2. Если результат сравнения сигналов окажется *истиной*, то на выходах (Вых.1 и Вых.2) операторов формируются сигналы «лог.1». Если же результат сравнения оказался *ложным*, то выходы операторов переключаются в состояние «лог.0». Сигналы «лог.0» и «лог.1» на первом выходе (Вых.1) коммутатора К, подключенного к управляющему входу первого переключателя П_1, задают направление поиска оптимального значения потокосцепления. Сигнал на втором выходе (Вых.2) коммутатора К, поступающий к управляющему входу второго переключателя П_2, останавливает или запускает процедуру поиска. На рис. 3 положение ключа переключателей П_1 и П_2 соответствует сигналу «лог.0» на их управляющих входах. Алгоритм работы коммутатора К можно представить в виде табл.

Алгоритм работы коммутатора

Вход x	Вых. 1	Вых. 2
-1	0	1
0	0	0
1	1	1

При уровне сигнала «лог.0» на управляющем входе первого переключателя П_1 его ключ находится в верхнем по схеме положении, шунтируя линию задержки Z_2 , и не происходит приращения сигнала потокосцепления $\Delta \psi$ на выходе переключателя П_1. При появ-

лении на управляющем входе сигнала «лог.1» ключ переключателя П_1 переводится в нижнее положение, при котором сигнал линии задержки Z_2 инвертируется инвертором *Инв*. Сигнал $\Delta \psi$ изменяет знак, обеспечивая противоположное направление поиска оптимального значения $\psi_R^{\text{опт}}$.

Уровень входного сигнала «лог.0» на управляющем входе второго переключателя П_2 приводит к шунтированию линии задержки Z_3 замкнутыми контактами переключателя П_2. При этом процесс поиска оптимального значения потокосцепления останавливается, а сигнал на выходе П_2 остается неизменным. При появлении на управляющем входе сигнала «лог.1» выходной сигнал переключателя получается в результате сложения сигналов в сумматоре $S_{\text{умм}}$ в соответствии с выражением:

$$\psi_R^{\text{опт}} = \psi_{R(i-1)}^{\text{опт}} + \Delta \psi,$$

где $\psi_{R(i-1)}^{\text{опт}}$ – значение потокосцепления на предыдущем $(i-1)$ -м шаге поиска.

Процесс поиска оптимального значения потокосцепления происходит до тех пор, пока величина приращения тока статора ΔI_S не станет меньше ширины зоны нечувствительности δ ПЭ. Таким образом, блок оптимального регулирования обеспечивает поиск оптимального значения потокосцепления $\psi_R^{\text{опт}}$, при котором ток статора I_S достигает оптимально низкого значения.

Имитационная модель системы управления

В соответствии с представленным алгоритмом оптимального регулирования разработана имитационная модель системы оптимального управления асинхронным двигателем, показанная на рис. 4. Модель системы реализована в среде моделирования SimInTech.

Структурную схему кроме рассмотренного блока оптимального регулятора составляют «Модель роторной цепи», «Система управления» и «Модель двигателя».

В блоке «Модель двигателя» реализована математическая модель асинхронного двигателя, описанная уравнениями в векторной форме:

$$\begin{aligned} U_{Sd} &= I_{Sd} R_S + L_{\text{эвб.}} \frac{dI_{Sd}}{dt} - I_{Sq} \omega L_{\text{эвб.}} + K_2 \frac{d\psi_R}{dt}; \\ U_{Sq} &= I_{Sq} R_S + L_{\text{эвб.}} \frac{dI_{Sq}}{dt} + I_{Sd} \omega L_{\text{эвб.}} + \omega K_2 \psi_R, \end{aligned} \quad (3)$$

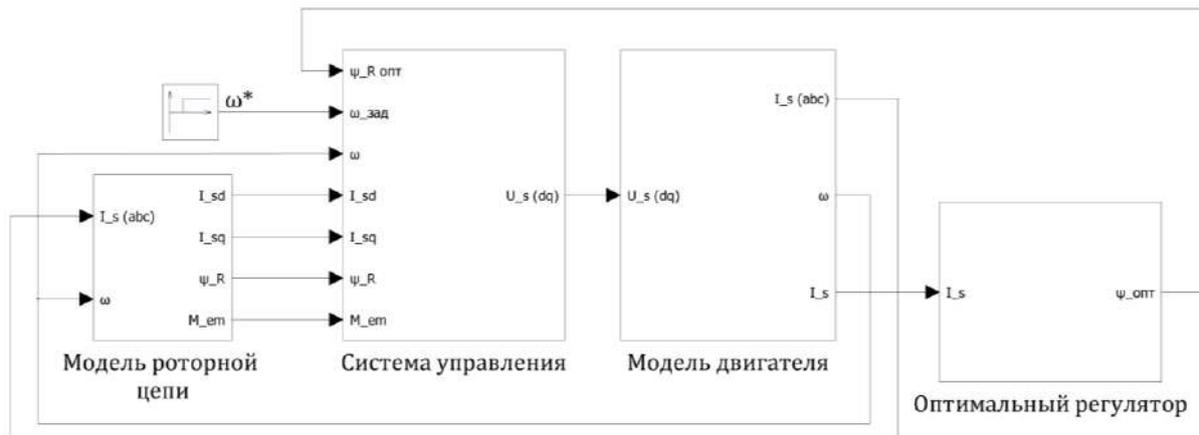


Рис. 4. Структурная схема двигателя с оптимальным управлением
 Fig. 4. Structural diagram of an engine with optimal control

где R_S – активное сопротивление обмотки статора; $L_{э\text{кв}}$ – общая индуктивность рассеяния статора; K_1 и K_2 – коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора соответственно [15].

Уравнение электромеханического равновесия в модели двигателя представлено в виде:

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

где M_{em} и M_c – электромагнитный момент и момент сопротивления на валу двигателя соответственно; ω_R – угловая частота вращения ротора; J – момент инерции ротора двигателя [16].

В соответствии с (3) и рис. 4, входными величинами модели двигателя являются проекции напряжений статора U_{sd} и U_{sq} на вращающиеся оси координат dq [2, 17]. На выходе модели получают значение тока статора I_S по ве-

личине его проекций I_{sd} и I_{sq} на оси координат dq . Модуль тока статора вычисляется, согласно выражению $I_S = \sqrt{I_{sd}^2 + I_{sq}^2}$. Рассчитанное значение тока I_S поступает в блок оптимального регулятора, где в соответствии с его величиной вычисляется оптимальное значение потокосцепления ротора $\psi_R^{\text{опт}}$. Сигнал $\psi_R^{\text{опт}}$ с выхода оптимального регулятора поступает на вход блока «Система управления», в котором вместе с сигналом заданной и фактической частоты вращения ротора, а также текущими значениями токов I_{sd} , I_{sq} рассчитываются проекции напряжения статора U_{sd} и U_{sq} на оси координат dq . Структурная схема блока «Система управления» представлена на рис. 5.

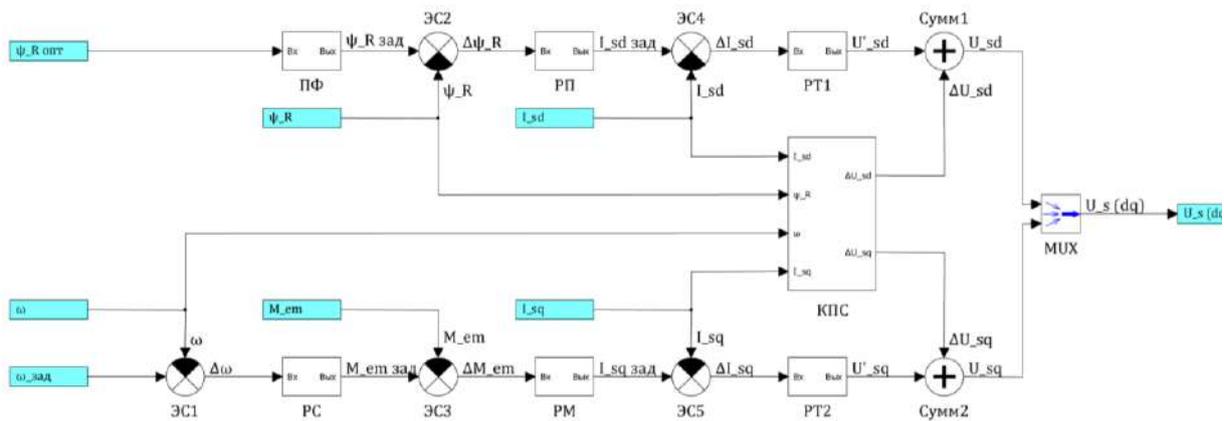


Рис. 5. Структурная схема блока «Система управления»:

ЭС1–ЭС5 – элементы сравнения; Сумм1, Сумм2 – сумматоры; ПФ, РС, РП, РМ, РТ1, РТ2 – блоки передаточной функции; КПС – блок компенсатора перекрестных связей; MUX – мультиплексор

Fig. 5. Block diagram of the «Control system» unit:

ЭС1 – ЭС5 – comparison elements; Сумм1, Сумм2 – adders; ПФ, РС, РП, РМ, РТ1, РТ2 – transfer function blocks; КПС – block of the cross connections compensator; MUX – multiplexer

Блок «Система управления» (рис. 5) представляет собой двухконтурную схему подчиненного регулирования по потокосцеплению ротора ψ_R и угловой скорости вращения ротора ω . Внешние контуры регулирования по ψ_R и ω формируют заданные значения токов $I_{sd_зад}$ и $I_{sq_зад}$ для внутренних контуров по соответствующим осям d и q . Внутренние контуры тока реализуют заданные значения этих токов.

Каждый из указанных контуров регулирования представляет собой регулятор по рассогласованию (ошибке). На его вход поступают сигналы заданного и фактического значения регулируемого параметра. Регулятор формирует управляющее воздействие, сводящее к нулю разность этих входных сигналов. В верхней части рис. 5 представлен регулятор потокосцепления РП, в нижней части – регулятор угловой скорости вращения РС. Исходными сигналами для этих каналов регулирования являются заданные значения потокосцепления ротора $\psi_{R_зад}$ и угловая скорость вращения ротора $\omega_{зад}$.

Во внешнем контуре регулятора потокосцепления с помощью элемента сравнения ЭС2 сравнивается заданное $\psi_{R_зад}$ и фактическое ψ_R значение потокосцепления ротора. По сигналу рассогласования $\Delta\psi_R = \psi_{R_зад} - \psi_R$ РП формирует заданное значение сигнала тока статора $I_{sd_зад}$ по оси d для внутреннего контура регулятора тока.

Во внутреннем контуре регулятора тока по оси d , состоящем из элемента сравнения ЭС4 и регулятора тока РТ1, формируется управляющее воздействие U'_{sd} . На входе ЭС4 сравнивается заданное $I_{sd_зад}$ и фактическое значение I_{sd} тока статора по оси d . По сигналу рассогласования $\Delta I_{sd} = I_{sd_зад} - I_{sd}$ регулятор тока РТ1 формирует управляющее воздействие U'_{sd} . Блок передаточной функции ПФ предназначен для плавного нарастания заданного значения потокосцепления ротора.

Аналогично работает канал регулирования угловой скорости вращения ротора. С помощью элемента сравнения ЭС1 происходит сравнение заданной $\omega_{зад}$ и фактической ω скорости вращения ротора. На выходе РС по сигналу рассогласования $\Delta\omega$ формируется сигнал заданного значения электромагнитного момента $M_{em_зад}$ для контура регулирования момента. На входе элемента сравнения ЭС3 сравнивается заданное $M_{em_зад}$ и фактическое значение M_{em} электромагнитного мо-

мента. Регулятор момента (РМ) формирует заданное значение сигнала тока статора по оси q для внутреннего контура регулятора тока, состоящим из элемента сравнения ЭС5 и регулятора тока РТ2, формируется управляющее воздействие U'_{sq} .

Блок компенсатора перекрестных связей (КПС) формирует компенсирующие напряжения ΔU_{sd} и ΔU_{sq} по осям d и q , которые с помощью соответствующих сумматоров *Сумм1* и *Сумм2* складываются с выходными сигналами управления по каналам потокосцепления U'_{sd} и угловой скорости ротора U'_{sq} . Эти сигналы через мультиплексор (MUX) поступают на выход блока «Система управления».

Сигналы напряжения U_{sd} и U_{sq} с выхода системы управления поступают на вход блока «Модель двигателя», в котором в соответствии с этими значениями рассчитывается текущее значение частоты вращения ротора при минимальной (оптимальной) величине тока статора.

В блоке «Модель роторной цепи» выполняются преобразования сигналов тока статора из неподвижной системы координат abc во вращающуюся dq [18, 19] и вычисляется величина электромагнитного момента M_{em} в соответствии с выражением:

$$M_{em} = \frac{3}{2} z_p K_2 \psi_R I_{sq}$$

Результаты моделирования

На рис. 6 представлены результаты имитационного моделирования работы устройства оптимального регулирования на примере асинхронного двигателя 4А225М4У3 при трех значениях электромагнитного момента M_{em} .

В соответствии со значениями M_{em} устройство осуществляет пошаговый поиск оптимального значения потокосцепления ротора. Из анализа рисунка следует, что устройство работает устойчиво как при увеличении, так и при уменьшении электромагнитного момента. После окончания переходного процесса, связанного с изменением M_{em} , устройство формирует постоянный по величине сигнал оптимального потокосцепления ротора. Это выгодно отличает его от устройства экстремального регулирования [20], характеризующегося пульсациями в форме сигнала в ψ_R^{opt} , ухудшающими устойчивость работы системы управления.

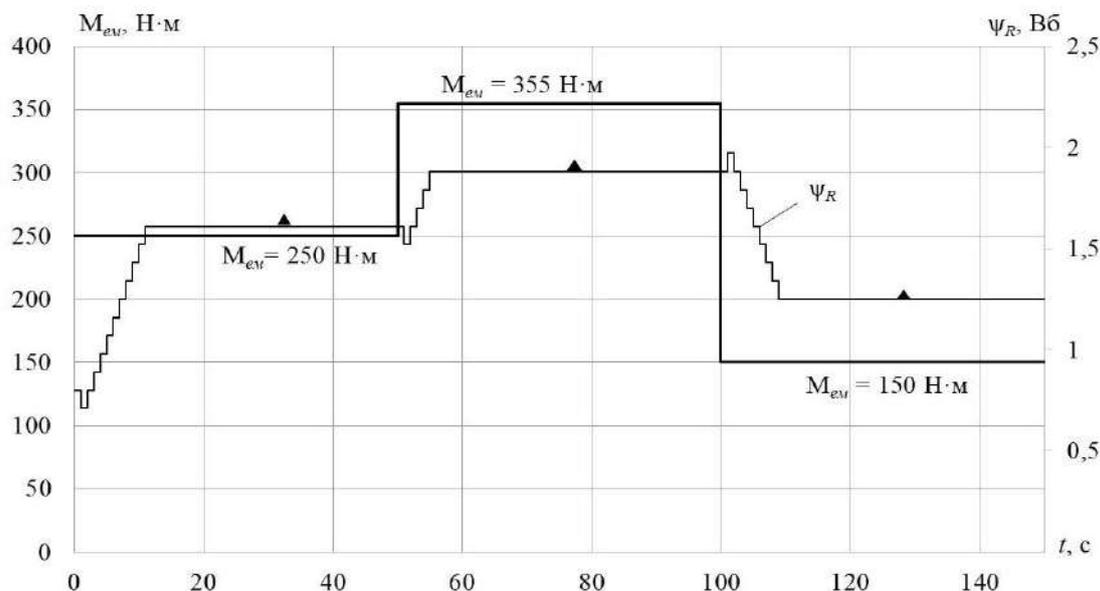


Рис. 6. Результаты имитационного моделирования

Fig. 6. Simulation results

На рисунке в виде треугольных маркеров отмечены оптимальные значения потокосцепления, рассчитанные в соответствии по выражению (3) для различных значений M_{em} . Из рисунка следует, что аналитические значения ψ_R^{opt} и значения ψ_R^{opt} , полученные в результате моделирования практически совпадают, что свидетельствует о высокой точности работы предложенного алгоритма поиска оптимального значения потокосцепления.

В соответствии со значениями M_{em} устройство осуществляет пошаговый поиск оптимального значения потокосцепления ротора. Из анализа рисунка следует, что устройство работает устойчиво как при увеличении, так и при уменьшении электромагнитного момента. После окончания переходного процесса, связанного с изменением M_{em} , устройство формирует постоянный по величине сигнал оптимального потокосцепления ротора. Это выгодно отличает его от устройства экстремального регулирования [20], характеризующегося пульсациями в форме сигнала в ψ_R^{opt} , ухудшающими устойчивость работы системы управления.

На рисунке в виде треугольных маркеров отмечены оптимальные значения потокосцепле-

ния, рассчитанные в соответствии по выражению (3) для различных значений M_{em} . Из рисунка следует, что аналитические значения ψ_R^{opt} и значения ψ_R^{opt} , полученные в результате моделирования практически совпадают, что свидетельствует о высокой точности работы предложенного алгоритма поиска оптимального значения потокосцепления.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что предложенная система оптимального регулирования является эффективным средством повышения энергетических показателей асинхронного привода. Использование оптимальной системы регулирования позволяет уменьшить ток двигателя до оптимально низких значений, а также сократить электрические потери во всех режимах работы. С помощью математической модели системы, реализованной в отечественном пакете прикладных программ SimInTech, можно анализировать работоспособность различных вариантов исполнения систем управления асинхронным двигателем.

Список литературы

1. Костенко М.П. Электрические машины. Специальная часть. Л. : Госэнергоиздат, 1949. 708 с.
2. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvektor-Regelung von Drehfeldmaschinen // Siemens-Zeitschrift. 1971, Vol. 45, S. 757–760.

3. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford : Oxford University Press, 1998. 729 p.
4. Bajenescu Titu-Marius. The Insulated-Gate Bipolar Transistors (IGBT) and their Reliability // *Electrotehnica, Electronica, Automatica*. 2012. Vol. 60. № 2. URL : https://www.researchgate.net/publication/289745294_The_insulated-gate_bipolar_transistors_IGBT_and_their_reliability (Дата обращения 7.11.2022).
5. Кулинич Ю.М. Электронная преобразовательная техника. М. : УМЦ ЖДТ, 2015. 204 с.
6. Колпаков А. Перспективы развития электропривода // *Силовая электроника*. 2004. № 1. С. 46–48.
7. Branko Blanusa. New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives // *New Trends in Technologies : Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*. 2010. P. 341–358.
8. Лазарев Г. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных систем // *Новости электротехники*. 2005. № 2 (32). С. 15–20.
9. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб. : Питер, 2010. 350 с.
10. Шрейнер Т.Р., Дмитренко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. Кишинев : Штиинца, 1982. 224 с.
11. Виноградов А.Б., Изосимов Д.Б., Флорентьев С.Н. Оптимизация КПД системы векторного управления асинхронным тяговым электроприводом с идентификатором параметров // *Электротехника*. 2010. № 12. С. 12–19.
12. Шонин О.Б., Пронько В.С. Энергосберегающие алгоритмы частотного управления асинхронным приводом с уточнением области минимума потерь на основе методов нечеткой логики // *Записки Горного института*. 2016. Т. 218. С. 270–280.
13. Герман-Галкин С.Г., Карташов Б.А., Литвинов С.Н. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech. М. : ДМК Пресс, 2021. 494 с.
14. Калачёв Ю.Н. SimInTech: моделирование в электроприводе. М. : ДМК Пресс, 2019. 98 с.
15. Моделирование векторного управления асинхронным приводом вспомогательных машин электроподвижного состава / Ю.М. Кулинич, С.А. Шухарев, В.К. Духовников и др. // *Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп.* 2022. Т. 81. № 1. С. 23–30.
16. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
17. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). М. : ЭФО, 2013. 66 с.
18. Pradeep J., Devanathan R. Adoption of Park's Transformation for Inverter Fed Drive // *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2015. Vol. 5. № 3. P. 366–373.
19. Bellan D. Clarke Transformation Solution of Asymmetrical Transients in Three-Phase Circuits // *Energies*. 2020. 13. 5231. DOI 10.3390/en13195231.
20. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A. Application of an Extreme Control System to Operate the Reactive Power Compensator of an Electric Locomotive // *Russian Electrical Engineering*. 2016. Vol. 87. № 2. 3 p.

References

1. Kostenko M.P. Elektricheskie mashiny. Spetsial'naya chast' [Electrical Machines. Special part]. Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1949. 708 p.
2. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvektor-Regelung von Drehfeldmaschinen. *Siemens-Zeitschrift*. 1971, vol. 45, pp. 757–760.
3. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford : Oxford University Press, 1998. 729 p.
4. Bajenescu Titu-Marius. The Insulated-Gate Bipolar Transistors (IGBT) and their Reliability. *Electrotehnica, Electronica, Automatica*. 2012, Vol. 60, no 2. Available at: https://www.researchgate.net/publication/289745294_The_insulated-gate_bipolar_transistors_IGBT_and_their_reliability (Accessed November 7, 2022).
5. Kulinich Yu. M. Elektronnaya preobrazovatel'naya tekhnika [Electronic converting technology]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2015. 204 p.
6. Kolpakov A. Perspektivy razvitiya elektroprivoda [Electric drive development prospects]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2004, no. 1, pp. 46–48.
7. Branko Blanusa. New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives. *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*, 2010, pp. 341–358.
8. Lazarev G. Vysokovol'tnye preobrazovateli dlya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda. Postroenie razlichnykh sistem [High voltage converters for variable-speed drive. Construction of various systems]. *Novosti e'lektrotexniki* [News of electrical engineering], 2005, no. 2 (32), pp. 15–20.
9. Voldek A.I., Popov V.V. Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka [Electric cars. AC Machines]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2010. 350 p.
10. Shreiner T.R., Dmitренко Yu.A. Optimal'noe chastotnoe upravlenie asinkhronnymi elektroprivodami [The optimum frequency control of asynchronous electric drives]. Kishinev: Shtiintsa Publ., 1982. 224 p.
11. Vinogradov A.B., Izosimov D.B., Florentsev S.N. Optimizatsiya KPD sistema vektornogo upravleniya asinkhronnym tyagovym elektroprivodom s identifikatorom parametrov [Optimizing the efficiency of vector control system of traction induction motor drive with the parameter identifier]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2010, no. 12, pp. 12–19.
12. Shonin O.B., Pron'ko V.S. Energosberegayushchie algoritmy chastotnogo upravleniya asinkhronnym privodom s utochneniem oblasti minimuma poter' na osnove metodov nechetkoi logiki [Energy-saving algorithms for frequency control of an asynchronous drive with refinement of the region of minimum losses based on fuzzy logic methods]. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], 2016, vol. 218, pp. 270–280.

13. German-Galkin S.G., Kartashov B.A., Litvinov S.N. Model'noe proektirovanie elektromekhanicheskikh mekhatronnykh modulei dvizheniya v srede SimInTech [Model design of electromechanical mechanisms of mechatronic motion in the SimInTech environment]. Moscow. DMK Press, 2021. 494 p.
14. Kalachev Yu.N. SimInTech: modelirovaniye v elektroprivode [SimInTech: simulation in electric drive]. Moscow: DMK Press, 2019. 98 p.
15. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A., Dukhovnikov V.K., Gulyaev A.V. Modelirovanie vektornogo upravleniya asinkhronnym privodom vspomogatel'nykh mashin elektropodvizhnogo sostava [Modeling vector control of the asynchronous drive of electric rolling stock auxiliary machines]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport], 2022, vol. 81, no. 1, pp. 23–30.
16. Usol'tsev A.A. Chastotnoye upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami [Frequency control of asynchronous motors]. Saint Petersburg: SPbGU ITMO Publ., 2006. 94 p.
17. Kalachev Yu.N. Vektornoe regulirovanie (zametki praktika) [Vector regulation (practice notes)]. Moscow: EFO Publ., 2013. 66 p.
18. Pradeep J., Devanathan R. Adoption of Park's Transformation for Inverter Fed Drive. *International Journal of Power Electronics and Drive System*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 366–373.
19. Bellan D. Clarke Transformation Solution of Asymmetrical Transients in Three-Phase Circuits. *Energies*, 2020, no. 13, P. 5231. DOI 10.3390/en13195231.
20. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A. Application of an Extreme Control System to Operate the Reactive Power Compensator of an Electric Locomotive. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 2, 3 p.

Информация об авторах

Кулинич Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: kulinitsch@rambler.ru.

Шухарев Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: shuharevsa@gmail.com.

Стародубцев Дмитрий Алексеевич, аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: dastarodubcev21@gmail.com.

Information about the authors

Yurii M. Kulinich, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk; e-mail: kulinitsch@rambler.ru.

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

Dmitrii A. Starodubtsev, Ph.D. student of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk; e-mail: dastarodubcev21@gmail.com.

Увеличение пропускной способности участка Слюдянка-1 – Улан-Удэ за счет построения оптимальной модели движения поездов

Ю.И. Белоголов✉

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

✉belogolov_yi@irgups.ru

Резюме

Разработка новых подходов к повышению пропускной способности на железнодорожном транспорте была и остается одной из основных задач, которой уделяется достаточно большое внимание. В современных условиях для усиления пропускной и провозной способностей актуальным является уплотнение графика движения, более полное использование имеющейся инфраструктуры и технических средств, применение современных интеллектуальных систем управления и других организационных и технических решений, направленных на переработку и формирование большего числа вагонопотоков и поездопотоков. В статье предлагается рассмотреть и смоделировать работу участка Слюдянка-1 – Улан-Удэ при внедрении систем интервального регулирования движения поездов, а также определяется потенциальность пропуска большего количества поездов по сравнению с существующей технологией. Для увеличения пропускной способности на участке Слюдянка-1 – Улан-Удэ в качестве такой системы рассматривается возможность применения АБТЦ-МШ. Моделирование работы участка заключается в разработке алгоритма и построении потоковых моделей, отражающих прибытие и отправление поездов по основным станциям участка, позволяющих выявить резервы времени в отправлении большего количества поездов. По результатам моделирования и расчетов производится построение ведомости поездопотоков участка, строится предлагаемый график движения поездов и рассчитываются его показатели. Итогом исследования является вывод о перспективе применения инновационных технологий в области интервального регулирования движения поездов на участке Слюдянка-1 – Улан-Удэ и даются практические рекомендации.

Ключевые слова

системы интервального регулирования, потоковые модели, график движения поездов, АБТЦ-МШ, сокращение интервалов между поездами, участок Слюдянка-1 – Улан-Удэ

Для цитирования

Белоголов Ю.И. Увеличение пропускной способности участка Слюдянка-1 – Улан-Удэ за счет построения оптимальной модели движения поездов / Ю.И. Белоголов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 94–105. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).94-105.

Информация о статье

поступила в редакцию: 22.02.2023 г.; поступила после рецензирования: 17.03.2023 г.; принята к публикации: 18.03.2023 г.

Increasing the throughput capacity of the Slyudyanka-1 - Ulan-Ude section by building an optimal train traffic model

Yu.I. Belogolov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉belogolov_yi@irgups.ru

Abstract

The development of new approaches to increasing the throughput in railway transport has been and remains one of the main tasks, which is receiving quite a lot of attention at the present time. In modern conditions, in order to strengthen the throughput and carrying capacity, it is important to tighten the traffic schedule, make fuller use of the existing infrastructure and technical means, use modern intelligent control systems and other organizational and technical solutions aimed at processing and forming a larger number of car traffic and train traffic. The article proposes to consider and simulate the operation of the Slyudyanka-1 – Ulan-Ude section during the implementation of interval train control systems and determines the possibility of passing a larger number of trains as compared to the existing technology. To increase the capacity on the section Slyudyanka-1 – Ulan-Ude, the possibility of using ABTC-MSh is considered as such a system. Modeling the work of the section consists in the development of an algorithm and the construction of flow models reflecting the arrival and departure of trains at the main stations of the section, which makes it possible to identify time reserves in the departure of a larger number of trains. Based on the results of modeling and calculations, a list of train flows of the section is formed, a proposed train schedule is built and its indicators are calculated. At the end of the article, a conclusion is made about the prospects for the application of innovative technologies in the field of interval control of train traffic on the Slyudyanka-1 – Ulan-Ude section and practical recommendations are given.

Keywords

interval control systems, flow models, train schedule, ABTTs-MSh, reduction of intervals between trains, section Slyudyanka-1 – Ulan-Ude

For citation

Belogolov Yu.I Uvelichenie propusknoi sposobnosti uchastka Slyudyanka-1 – Ulan-Ude za schet postroeniya optimal'noi modeli dvizheniya poezdov [Increasing the throughput capacity of the Slyudyanka-1 – Ulan-Ude section by building an optimal train traffic model]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 94–105. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).94-105.

Article Info

Received: February 22, 2023; Received: March 17, 2023; Accepted: March 18, 2023.

Введение

Ежегодно возрастающие потребности [1] в пропуске большего количества поездов и объемов перевозимых грузов при существующем путевом развитии, тяговом подвижном составе и других инфраструктурных характеристик приводит к необходимости развития направления, связанного с сокращением и, как следствие, оптимизацией расстояния между движущимися поездами (интервала следования) [2]. Такое направление связано, прежде всего, с использованием современных

систем интервального регулирования движения поездов (СИРДП). В настоящее время проведение большая работа по тиражированию таких СИРДП, как автоблокировка с тональными рельсовыми цепями (АБТЦ) и различных ее модификаций, активно решаются задачи по определению координат движущихся объектов с использованием GPS-Глонасс, развивается и внедряется технология подвижных блок-участков и виртуальной сцепки, проводятся исследования в области перспективных разработок, например, СИРДП «Анаконда» с пере-

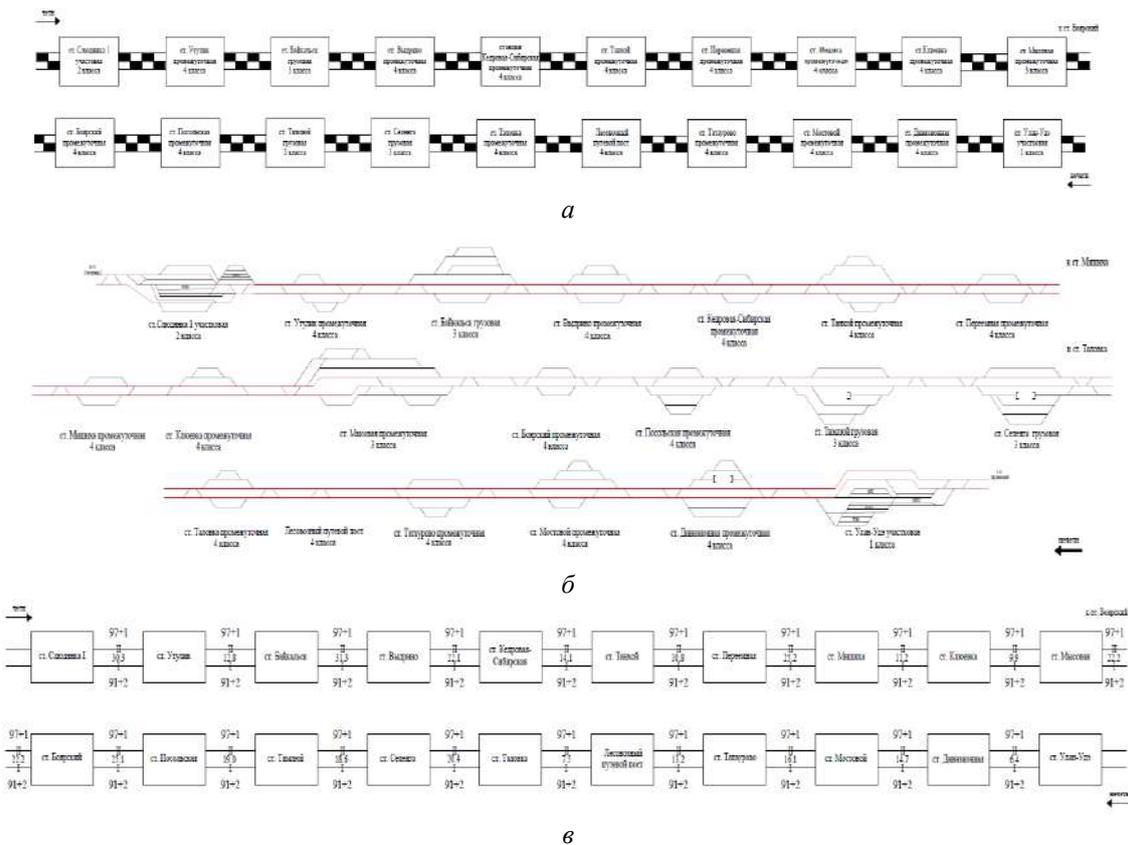


Рис. 1. Участок железной дороги Слюдянка 1 – Улан-Удэ:
 а – схема участка; б – путевое развитие участка; в – пропускная способность перегонов
Fig. 1. Railway section Slyudyanka 1 – Ulan-Ude:
 a – plot diagram; b – track development of the section; c – throughput of hauls

дачей данных по цифровому радиоканалу, что подтверждает большой интерес к этому направлению. Научно-технический совет ОАО «РЖД» неоднократно подчеркивал, что развитие восточной части страны будет осуществляться не только за счет модернизации инфраструктуры, но и внедрения инновационных СИРДП [3]. В настоящее время существуют различные автоматизированные системы имитационного моделирования (например, AnyLogic), позволяющие провести качественный и количественный анализ работы транспортных объектов с использованием методов математического моделирования. При этом в компании ОАО «РЖД» разработана Интеллектуальная система управления железнодорожным транспортом (ИСУЖТ ТС), предназначенная для имитационного моделирования работы станций и участков, позволяющая выявлять «узкие места», проводить оценку инфраструктурного и технологического развития, осуществлять моделирование и т.д. Перед выполнением большого объема работ по моделированию и наладке модели в автоматизированной системе имитационного моделирования, важной задачей является проведение предварительной оценки и исследований с целью увеличения пропускной способности участков [4–6]. В качестве объекта такого исследования был выбран участок Слюдянка-1 – Улан-Удэ.

Исходная потоковая модель участка Слюдянка-1 – Улан-Удэ

Участок Слюдянка 1 – Улан-Удэ (рис. 1) относится к третьему району управления. Протяженность составляет 330,9 км, перегоны участка оснащены четырехзначной автоблокировкой с тональными рельсовыми цепями, постоянно действующими устройствами двухсторонней автоблокировки (при движении в неправильном направлении по сигналам автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия).

На указанном участке располагаются две технические станции:

- ст. Слюдянка-1 по характеру своей деятельности относится к участковой станции, а по объему выполняемой работы является станцией второго класса.

- ст. Улан-Удэ является участковой, но в отличие от ст. Слюдянка-1, отнесена к первому классу.

Помимо технических на участке имеется 15 промежуточных станций, три из них находятся на диспетчерском управлении – это ст. Мишиха, Ключевка, Боярский, а также 3 грузовые – Байкальск, Тимлюй, Селенга.

Для рассмотрения возможности применения современных СИРДП необходимо провести предварительный анализ участка, определить «узкие места» и смоделировать его работу [7, 8].

Следует также отметить, что рассмотрение вопросов применения современных СИРДП, например, АБТЦ-МШ с централизованным размещением аппаратуры в монтажных шкафах на участке Слюдянка 1 – Улан-Удэ, обусловлен наличием этой же системы на прилегающем участке Большой Луг – Слюдянка-2, введенной в эксплуатацию в 2021 г., поэтому участок Слюдянка-1 – Улан-Удэ станет логическим продолжением.

Для предварительной оценки поездопотоков рассматриваемого участка необходимо построить исходную потоковую модель. При ее построении (рис. 2) большая часть промежуточных станций, а также станций, на которых поезда не имеют стоянок, не учитывались.

Алгоритм расчета продвижения поездопотоков по участку Слюдянка-1 – Улан-Удэ

С целью оптимизации прибытия, отправления и продвижения поездопотоков для рассматриваемого участка был разработан алгоритм [9–11], представленный ниже.

В алгоритме используются следующие обозначения: S – исток графа; A – сток графа; i, j, k – вершины долей графа; T – время на дугах между долями графа; T_{Si} – прогнозируемое время прибытия поездов на станцию; T_{kA} – прогнозируемое время отправления поезда со станции; $t_{техн}$ – технологическое время обработки поезда на станции.

Алгоритм выполнения расчетов приводит к упорядочению потока прибытия поездов на станцию с тем, чтобы обеспечить максимально возможный размер движения поездов, и определяет требуемый для этого график их поступления и отправления. Оптимальному графику соответствует нахождение «весов» вершин второй и третьей доли графа.

Для оценки эффективности пропуска грузовых поездов на участке Слюдянка-1 – Улан-Удэ

при внедрении системы интервального регулирования, например, АБТЦ-МШ, необходимо:

– сопоставить прогнозные время прибытия (T_i) с возможным (T_j) –

$$T_i > T_j; T_i = T_j; T_i < T_j;$$

– сопоставить временные интервалы прибытия I_i и отправления I_j для граничных станций участка (при условии $I_{\text{опт}} = 10$ мин.) –

$$I_i, I_k > I_{\text{опт}}; I_i, I_k = I_{\text{опт}}; I_i, I_k < I_{\text{опт}}.$$

Примем следующие допущения:

$$I_{\min} = 5 \text{ мин.}; I_{\text{опт}} = 10 \text{ мин.}; \Delta I_{\min} \{ \Delta I_i; \Delta I_k \}; T_{Si}, T_{kA}, t_{\text{тех}} = \text{const.}$$

Ниже приводится алгоритм выработки требований к поступлению и отпавлению поездов для станций участка:

1. Положим, что $i = k = 1, j = 0$.

2. Если $\Delta I > I_{\text{опт}}$, то идем к третьему пункту алгоритма, если $\Delta I = I_{\text{опт}}$, то к четвертому пункту, если $\Delta I < I_{\text{опт}}$, то к пятому пункту алгоритма.

3. Вычислим $\Delta I_{Si} = T_{Si} - T_{Si+1}$; $\Delta I_{kA} = T_{kA} - T_{kA+1}$; $j' = j + n$, $n = \frac{\Delta I}{I_{\min}} - 1$; $T_{\min(i,k)j} = T_{\min(Si,kA)} - I_{\min}$; $T_{\max(i,k)j} = T_{\min(i,k)j} -$

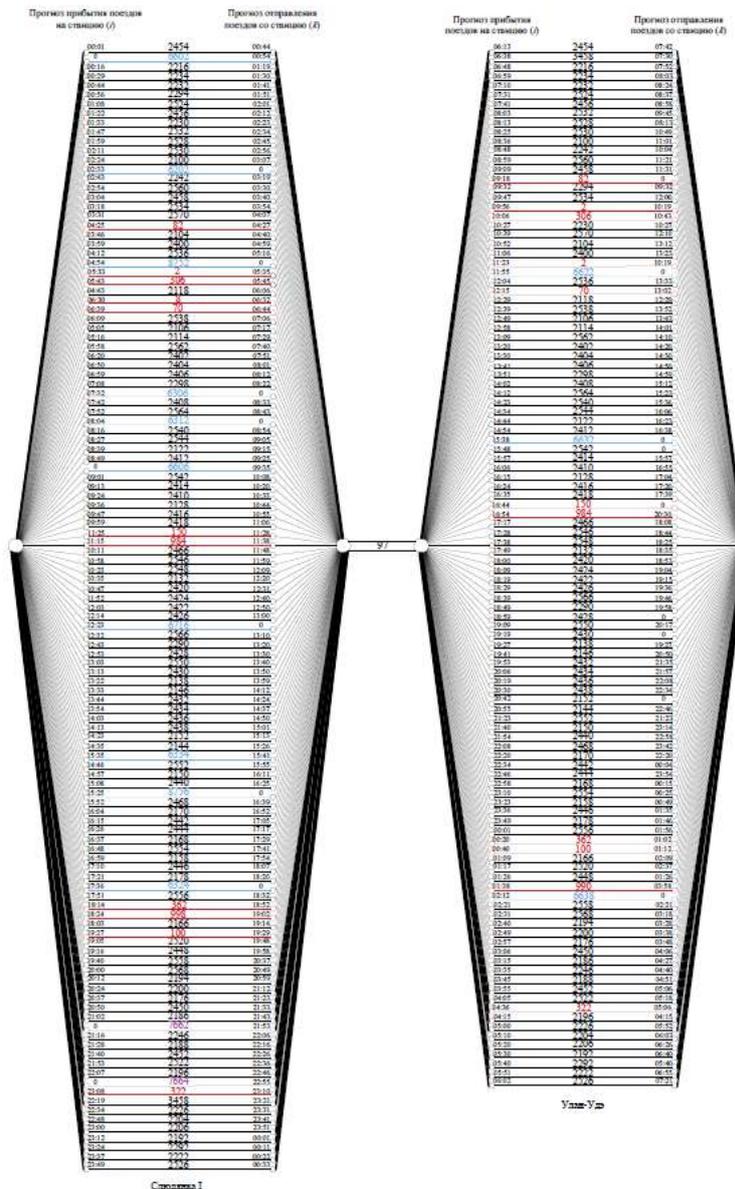


Рис. 2. Исходная потоковая модель, отражающая прибытие и отправление поездов на станции Слюдянка-1 и Улан-Удэ

Fig. 2. Initial flow model reflecting the arrival and departure of trains at Slyudyanka-1 and Ulan-Ude stations

$t_{\text{техн}}$, $i = i + 1$, $k = k + 1$. Если $\Delta I_{ij}, \Delta I_{kj} > I_{\text{опт}}$, то повторяем алгоритм по п. 3 для новых T_{ij} и T_{kj} , при этом $\Delta I_{ij} = T_{Si} - T_{ij}$; $\Delta I_{jk} = T_{kA} - T_{jk}$, иначе возвращаемся к п. 2. Если $i > i_{\text{max}}$ или $k > k_{\text{max}}$, то переходим к п. 6, иначе – к п. 2.

4. Вычислим $\Delta I_{Si} = T_{Si} - T_{Si+1}$; $\Delta I_{kA} = T_{kA} - T_{kA+1}$; $j' = j + 1$, $T_{\min(i,k)j} = T_{\min(Si,kA)} - I_{\min}$; $T_{\max(i,k)j} = T_{\min(i,k)j} - t_{\text{техн}}$, $i = i + 1$, $k = k + 1$. Если $i > i_{\text{max}}$ или $k > k_{\text{max}}$, то переходим к п. 6, иначе – к п. 2.

5. Вычислим $\Delta I_{Si} = T_{Si} - T_{Si+1}$; $\Delta I_{kA} = T_{kA} - T_{kA+1}$; $j' = j = i$, $T_{\min(i,k)j} = T_{\min(Si,kA)}$; $T_{\max(i,k)j} = T_{\min(i,k)j} - t_{\text{техн}}$, $i = i + 1$, $k = k + 1$. Если $i > i_{\text{max}}$ или $k > k_{\text{max}}$, то переходим к п. 6, иначе – к п. 2.

6. Составляем график прибытия и отправления поездов на станцию для всех значений i, j, k .

Рассмотрим пример реализации алгоритма для станции Слюдянка-1.

1.1. Положим $i = k = 2, j = 2$.

Исходные данные: $I_{\min} = 5$ мин.; $I_{\text{опт}} = 10$ мин.; $T_{Si=2} = 00:16$ ч; $T_{k=2A} = 01:19$ ч; $T_{Si=3} = 00:29$ ч; $T_{k=3A} = 01:30$ ч; $t_{\text{техн}}^2 = 01:03$ ч.

Переходим к п. 2 алгоритма.

1.2. Вычислим $\Delta I_{Si=2} = 00:29 - 00:16 = 00:13$ ч; $\Delta I_{k=2A} = 01:30 - 01:19 = 00:11$ ч;

$\Delta I = \min(00:13; 00:11) = 00:11$ ч; так как $\Delta I > I_{\text{опт}}$ – переходим к п. 3.

1.3. Вычислим $n = 11/5 - 1 \approx 1$; $j' = 2 + 1 = 3$; $T_{k=2j=3} = 01:19 - 00:05 = 01:14$; $T_{i=2j=3} = 01:14 - 01:03 = 00:11$, $i = 2 + 1 = 3$. Если $i > i_{\text{max}}$, то переходим к п. 6 алгоритма, иначе – к п. 2.

Для начала определим значения i, j, k . Запишем первый пункт алгоритма.

2.1. Положим, что $i = k = 3, j = 3$.

Исходные данные для последующих вычислений, согласно построенным потоковым моделям, будут следующие: $I_{\min} = 5$ мин.; $I_{\text{опт}} = 10$ мин.; $T_{Si=3} = 00:29$ ч; $T_{k=3A} = 01:30$ ч; $T_{Si=4} = 00:44$ ч; $T_{k=4A} = 01:41$ ч; $t_{\text{техн}}^3 = 01:01$ ч.

2.2. Вычислим $\Delta I_{Si=3} = 00:44 - 00:29 = 00:15$ ч; $\Delta I_{k=3A} = 01:41 - 01:30 = 00:11$ ч; $\Delta I = \min(00:15; 00:11) = 00:11$ ч; так как $\Delta I > I_{\text{опт}}$ – переходим к п. 3 алгоритма.

2.3. Вычислим $n = 11/5 \approx 2$; $j' = 3 + 2 = 5$; $T_{k=3j=5} = 01:30 - 00:05 = 01:25$; $T_{i=3j=5} = 01:25 - 01:01 = 00:24$, $i = 3 + 1 = 4$. Если $i > i_{\text{max}}$, то переходим к п. 6 алгоритма, иначе – к п. 2.

Далее аналогично, согласно разработанному алгоритму.

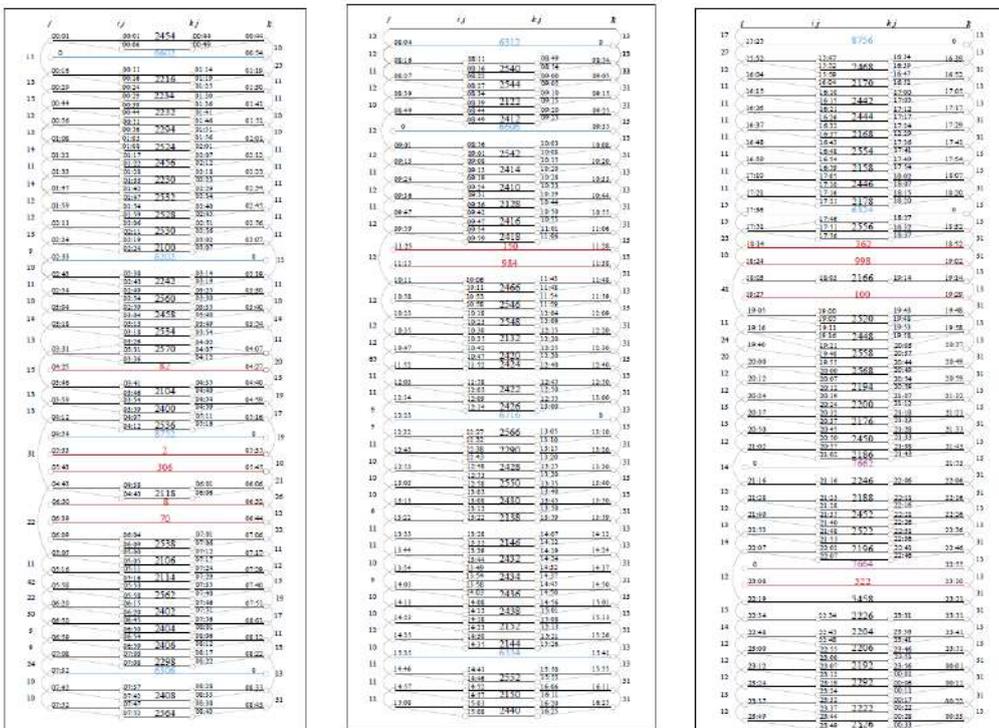


Рис. 3. Потоковая модель прибытия и отправления поездов на ст. Слюдянка-1

Fig. 3. Flow model of arrival and departure of trains at Slyudyanka-1 station

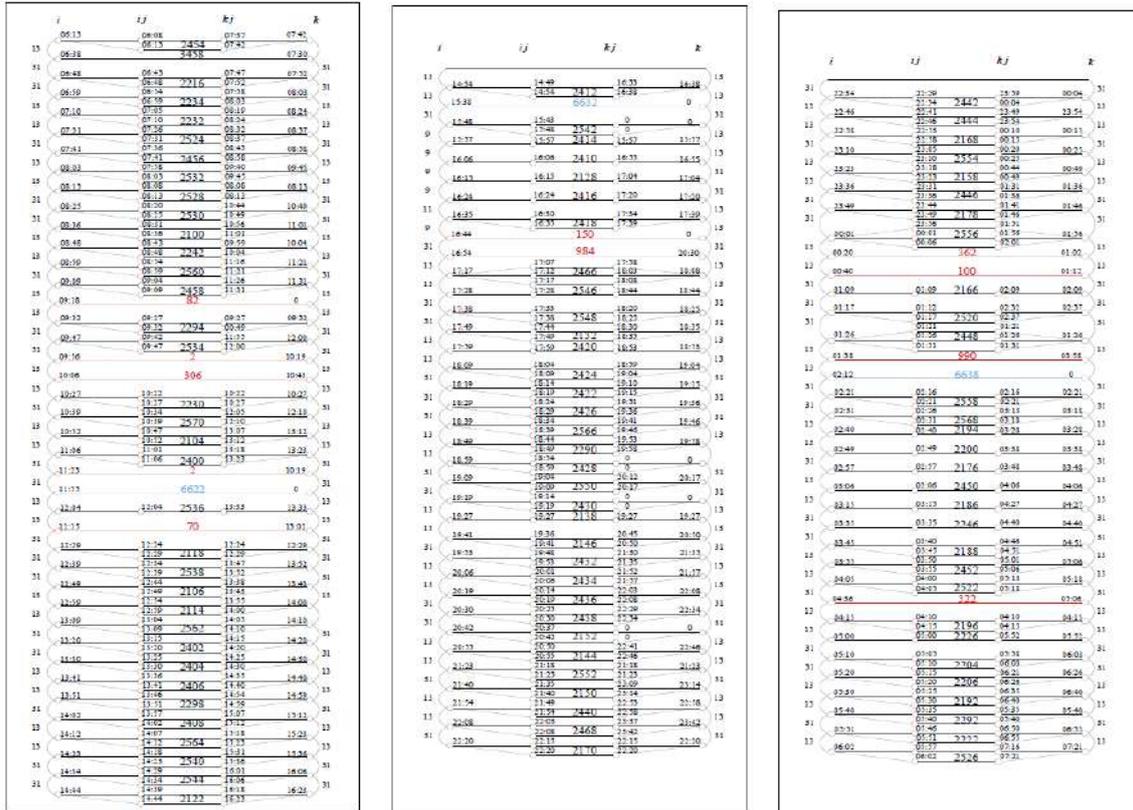


Рис. 4. Потоквая модель прибытия и отправления поездов на станции Улан-Удэ

Fig. 4. Flow model of arrival and departure of trains at Ulan-Ude station

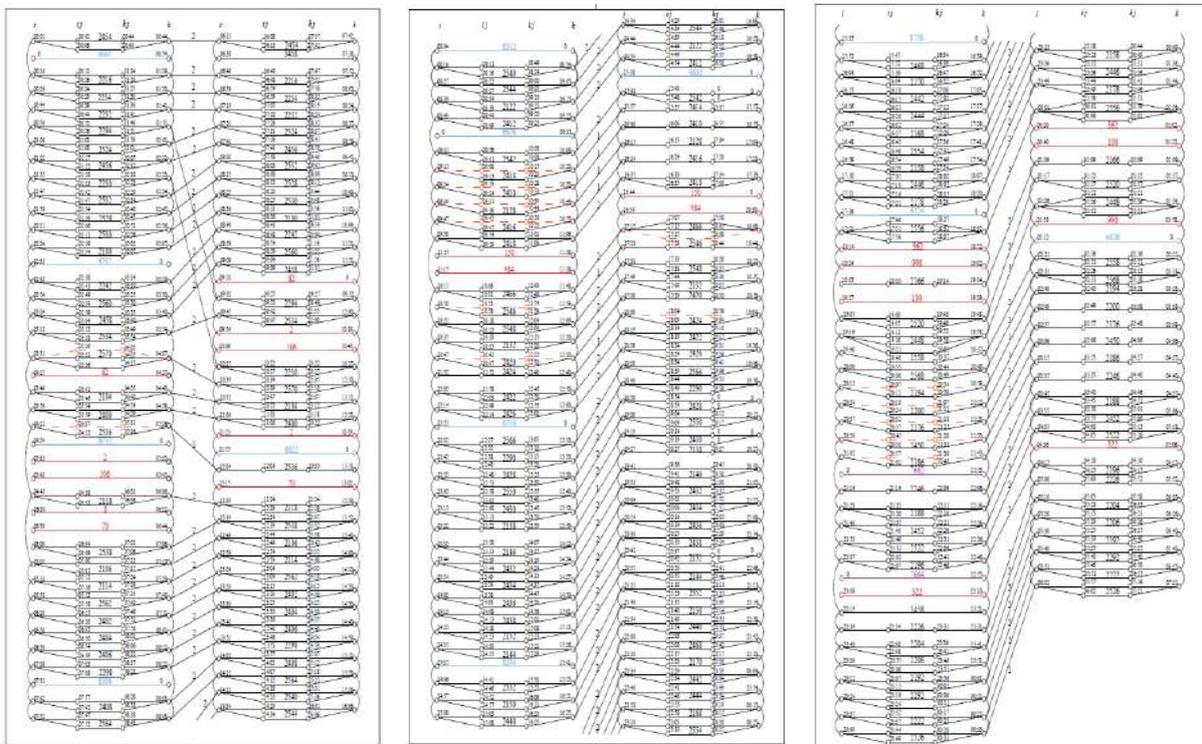


Рис. 5. Узвязка потоковых моделей по прибытию и отпавлению поездов на участке Слюдянка-1 – Улан-Удэ

Fig. 5. Linking flow models of the arrival and departure of trains on the section Slyudyanka-1 - Ulan-Ude

Таблица 1. Входная и выходная информация для оперативного планирования работы станций
Table 1. Input and output information for operational planning of stations

Существующее моделирование Existing modeling							Предлагаемое моделирование Proposed modeling						
Слюдянка-1			Улан-Удэ				Слюдянка-1			Улан-Удэ			
П/п	№	S_i	k_A	№	S_i	k_A	П/п	№	ij	k_j	№	ij	k_j
1	2454	00:01	00:44	2454	06:13	07:42	1	2454	00:01	00:44		06:08	07:32
2	2216	00:16	01:19	2216	06:48	07:52	2	Поезд	00:06	00:49	2454	06:13	07:42
3	2234	00:29	01:30	2234	06:59	08:03	3	Поезд	00:11	01:14	–	06:43	07:47
4	2232	00:44	01:41	2232	07:10	08:24	4	2216	00:16	01:19	2216	06:48	07:52
5	2294	00:56	01:51	2524	07:31	08:37	5	Поезд	00:24	01:25	–	06:54	07:58
6	2524	01:08	02:01	2456	07:41	08:58	6	2234	00:29	01:30	2234	06:59	08:03
7	2456	01:22	02:12	2532	08:03	09:45	7	Поезд	00:39	01:36	–	07:05	08:19
8	2230	01:33	02:23	2528	08:13	08:13	8	2232	00:44	01:41	2232	07:10	08:24
9	2532	01:47	02:34	2530	08:25	10:49	9	Поезд	00:51	01:46	–	07:26	08:32
10	2528	01:59	02:45	2100	08:36	11:01	10	2294	00:56	01:51	2524	07:31	08:37
11	2530	02:11	02:56	2242	08:48	10:04	11	Поезд	01:03	01:56	–	07:36	08:43
12	2100	02:24	03:07	2560	08:59	11:21	12	2524	01:08	02:01	2456	07:41	08:58
13	2242	02:43	03:19	2458	09:09	11:31	13	Поезд	01:17	02:07	–	07:58	09:40
14	2560	02:54	03:30	2294	09:32	09:32	14	2456	01:22	02:12	2532	08:03	09:45
15	2458	03:04	03:40	2534	09:47	12:00	15	Поезд	01:28	02:18	–	08:08	08:08
16	2534	03:18	03:54	2230	10:27	10:27	16	2230	01:33	02:23	2528	08:13	08:13
17	2570	03:31	04:07	2570	10:39	12:10	17	Поезд	01:42	02:29	–	08:20	10:44
18	2104	03:46	04:40	2104	10:52	13:12	18	2532	01:47	02:34	2530	08:25	10:49
19	2400	03:59	04:59	2400	11:06	13:23	19	Поезд	01:54	02:40	–	08:31	10:56
20	2536	04:12	05:16	2536	12:04	13:33	20	2528	01:59	02:45	2100	08:36	11:01
21	2118	04:43	06:06	2118	12:29	12:29	21	Поезд	02:06	02:51	–	08:43	09:59
22	2538	06:09	07:06	2538	12:39	13:52	22	2530	02:11	02:56	2242	08:48	10:04
23	2106	05:05	07:17	2106	12:49	13:43	23	Поезд	02:19	03:02	–	08:54	11:16
24	2114	05:16	07:29	2114	12:59	14:00	24	2100	02:24	03:07	2560	08:59	11:21
25	2562	05:58	07:40	2562	13:09	14:10	25	Поезд	02:38	03:14	–	09:04	11:26
26	2402	06:20	07:51	2402	13:20	14:20	26	2242	02:43	03:19	2458	09:09	11:31
27	2404	06:50	08:01	2404	13:30	14:30	27	Поезд	02:49	03:25	–	09:27	09:27
28	2406	06:59	08:12	2406	13:41	14:40	28	2560	02:54	03:30	2294	09:32	09:32
29	2298	07:08	08:22	2298	13:51	14:59	29	Поезд	02:59	03:35	–	09:42	11:55
30	2408	07:42	08:33	2408	14:02	15:12	30	2458	03:04	03:40	2534	09:47	12:00
31	2564	07:52	08:43	2564	14:12	15:23	31	Поезд	03:13	03:49	–	10:22	10:22
32	2540	08:16	08:54	2540	14:23	15:36	32	2534	03:18	03:54	2230	10:27	10:27
...

Далее аналогично, согласно, алгоритма Further similarly, according to the algorithm

На основании записанного алгоритма, строятся потоковые модели (рис. 3, 4), производится их увязка друг с другом (рис. 5), составляется сводная таблица (табл. 1) для оперативного планирования работы станций и производится построение графика движения поездов.

Планирование работы станций и построение графика движения поездов

Результаты, полученные при построении и оптимизации потоковых моделей на рис. 3–5 сведен в табл. 1 (фрагмент).

Предлагаемый график движения поездов, построенный на основании алгоритма выработки требований к поступлению и отправлению поездов на станциях при внедрении СИРДП, например, АБТЦ-МШ, представлен на рис. 6. Межпоездной интервал для поездов сокращен с 10 до 5 мин.

Следует отметить, что при разработке представленного на рис. 1 графика движения [12] не учитывались действующие ограничения, профиль пути, тяговые возможности участка,

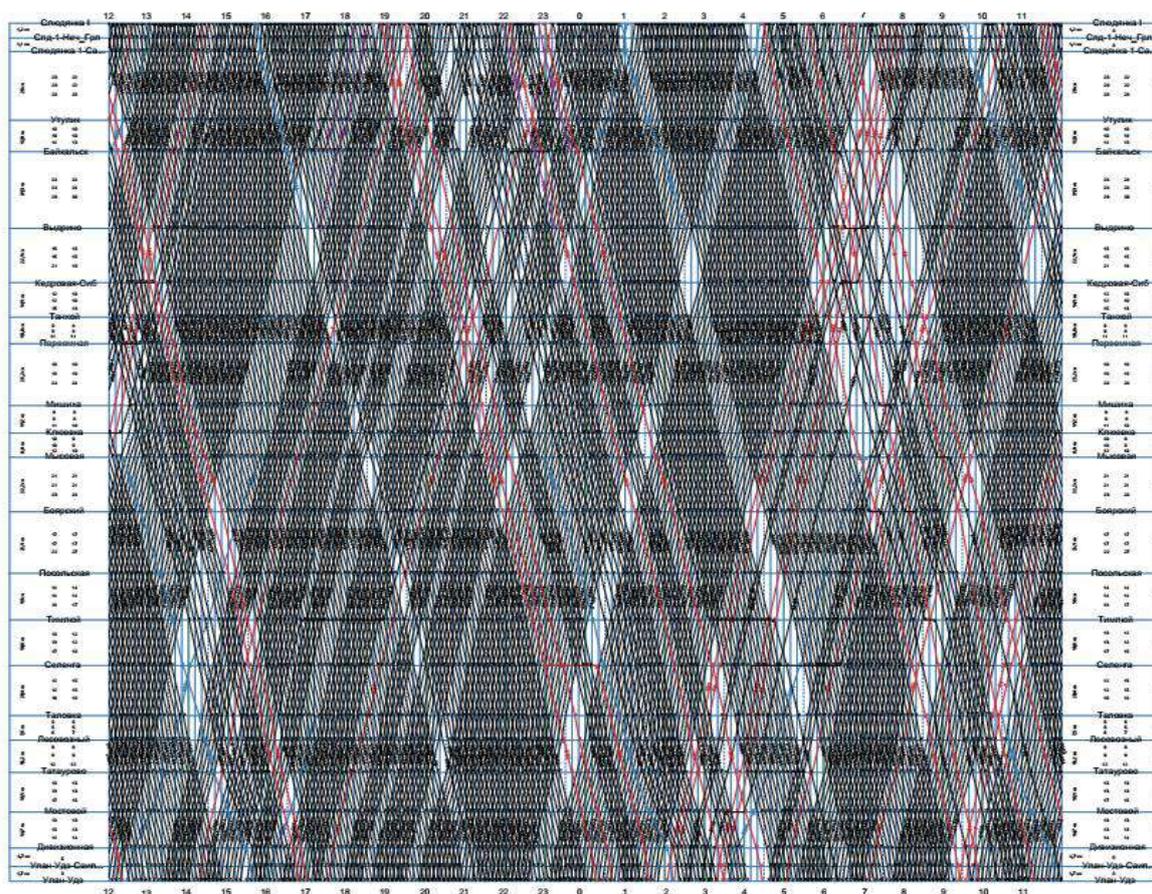


Рис. 6. График движения поездов после модернизации участка Слюдянка-1 – Улан-Удэ

Fig. 6. Train schedule after the modernization of the section Slyudyanka-1 – Ulan-Ude

основная цель – анализ изменений в работе участка от сокращения межпоездного интервала.

На основании графика движения определены показатели грузового движения (табл. 2), отражающие объем эксплуатационной работы, ее качество, а также использования локомотивного парка.

Проанализировав работу участка, можно сделать вывод, что при росте поездопотока есть вероятность затрудненного движения на технических станциях. Для предотвращения этого следует:

- сократить простой поездов под обработкой для беспрепятственного пропуска поездов;
- у поездов без обработки, но со сменой локомотива, параллельно осуществлять технологические операции на прием и сдачу локомотива под поездом;
- удлинить приемо-отправочные пути на ст. Переменная и Селенга;
- рассмотреть увеличение скорости движения поездов по путям и стрелочным перево-

дам ст. Слюдянка-1, Улан-Удэ, модернизацию устройств сигнализации, централизации и блокировки для сокращения времени следования поездов по станциям;

– пересмотреть технологию работы локомотивных эксплуатационных и сервисных депо для снижения времени проведения технологических операций.

Эти мероприятия целесообразно провести до планируемого роста пропускной способности с целью предотвращения затруднений в работе участка в целом.

Внедрение более современных СИРДП [13–17], например, АБТЦ-МШ требует технического перевооружения устройств инфраструктуры:

- расположить модули концентрации электрической централизации (ЭЦ-ТМ) [18] с оборудованием АБ на перегонах: Слюдянка-1 – Утулик, Байкальск – Выдрино, Переменная – Мишиха и Боярский – Посольская;

Таблица 2. Показатели эксплуатационной работы участка
Table 2. Indicators of the operational work of the site

Показатели Indicators	Единицы измерения Units	До внедрения АБТЦ-МШ Before implementation of ABTTs-MSh	После внедрения АБТЦ-МШ After implementation of ABTTs-MSh
Поездо-часы Train-hours	п-час train-hour	1 083,02	1 838,42
Количество поездов четного направления: – грузовые – пассажирские – пригородные – сборные Number of even direction trains: – cargo – passenger – suburban – prefabricated	поезд train	97 11 8 1	170 11 8 1
Количество поездов нечетного направления: – грузовые – пассажирские – пригородные – сборные Number of odd direction trains: – cargo – passenger – suburban – prefabricated	поезд train	91 10 8 2	166 10 8 2
Техническая скорость Technical speed	км/ч km/h	61	61
Участковая скорость Section speed	км/ч km/h	59	61
Коэффициент участковой скорости Section speed coefficient	-	0,96	0,99
Оборот локомотива Locomotive turnover	час hour	12,05	11,68
Потребное количество поездных локомотивов Required number of train locomotives	лок. лос.	97	165
Среднесуточный пробег локомотива Average daily locomotive mileage	км km	658,4	679,85
Производительность локомотива Locomotive performance	тыс. т-км- брутто thousand t- km-gross	4 148	4 283,1

– для корректной работы АБТЦ-МШ на станциях необходимо наличие МПЦ-ЭЛ, предусмотреть увязку этих систем;

– для корректной работы АБТЦ-МШ на станциях необходимо наличие МПЦ-ЭЛ, предусмотреть увязку этих систем;

– спроектировать главные пути на станциях и перегонах как независимые однопутные

двухсторонние линии;

– разработать комплекс мероприятий по повышению уровня киберзащищенности устройств управления и контроля;

– запроектировать микропроцессорную систему автоматической локомотивной сигнализации с подвижным блок-участком на базе аппаратуры АБТЦ-МШ по каждому пути пере-

гона участка, а также кодирование рельсовых цепей автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия 25 Гц и АЛС-ЕН;

– особое внимание уделить модернизации и усилению систем энергоснабжения, разработать мероприятия по техническому перевооружению существующих тяговых подстанций, замене оборудования, рассмотреть варианты по целесообразности строительства дополнительных комплексов тяговых подстанций.

После разработки алгоритма выработки требований к прибытию и отправлению поездов была построена потоковая модель оптимального прибытия и отправления поездов на участок, учитывающая входной и выходной поток поез-

дов на граничные станции для минимизации негативного влияния на соседние участки.

Заключение

На основании моделирования был построен оптимальный график движения поездов, по которому можно сделать вывод, что внедрение системы АБТЦ-МШ обеспечит сокращение интервалов следования поездов по перегонам и станциям до 5 мин. [19]. Это позволит повысить пропускную способность до 50 %. Однако такое увеличение пропускной способности возможно при «идеализированных» условиях работы участка.

Список литературы

1. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 19.03.2019 № 466 (ред. 13.10.2022). URL : <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201903210017> (Дата обращения 20.01.2023).
2. О вводе в действие типового технологического процесса управления местной работой : распоряжение ОАО «РЖД» от 15.04.2016 г. № 684р (ред. 25.07.2022). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
3. Прокопьева Е.С., Фомин С.А., Панин В.В. Определение станционных и межпоездных интервалов при интервальном регулировании движения поездов // Железнодорожный транспорт. 2017. №7. С. 20–23.
4. ОАО «РЖД» продолжит внедрение технологий интервального регулирования // АВП Технология : сайт. URL : <https://avpt.ru/news/oa0-zhd-prodolzhit-vnedrenie-tekhnologiy-intervalnogo-regulirovaniya/> (Дата обращения 16.02.2023).
5. Розенберг Е.Н., Аношкин В.В. Перспективы роста пропускной способности участка // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3 С. 4–7.
6. Белькова Ю.Д., Симоченко А.С., Белоголов Ю.И. Современные системы интервального регулирования движения поездов // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 97–102.
7. Кондратьева Л.А. Системы регулирования движения на железнодорожном транспорте. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2016. 322 с.
8. Белоголов Ю.И., Стецова Ю.М., Оленевич А.А. Использование методов математического моделирования при управлении транспортными процессами на железной дороге // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы девятой Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. Т.1. С. 145–148.
9. Белькова Ю.Д., Белоголов Ю.И. Построение графика движения поездов для участка Слюдянка I – Улан-Удэ при внедрении АБТЦ-МШ // Молодая наука Сибири. 2021. № 3 (13). С. 109–117.
10. Development of the performance control algorithm of the blower motors of electric locomotives for various operating modes / A.R. Akhmetshin, K.V. Suslov, N.P. Astashkov et al. // Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020) : IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Saint-Petersburg, 2020. DOI 10.1088/1757-899X/1111/1/012001.
11. Левин Д.Ю. Диспетчерские центры и технология управления перевозочным процессом. М. : Маршрут, 2005. 760 с.
12. Абрамов А.А. Управление эксплуатационной работой. Ч. II. График движения поездов и пропускная способность. М. : РГОТУПС, 2002. 171 с.
13. Макаров Н.М. Анализ систем интервального регулирования // Труды 79-ой студ. науч.-практ. конф. РГУПС. Воронеж, 2020. Т. 3. С. 39–41.
14. Долгий А.И. Концептуальный подход к построению современной платформы управления перевозочным процессом в ОАО «РЖД» // Труды АО «НИИАС». 2021. Т. 1. Вып. 11. С. 9–31.
15. Ратобильская Д.В. Пути повышения пропускной способности участков железнодорожной сети на основе имитационного моделирования // Математические машины и системы. 2010. № 2. С. 116–121.
16. Румянцев С.В. Технические средства интервального регулирования // Локомотив. 2019. № 5. С. 39–42.
17. Системы железнодорожной автоматики, телемеханики и связи (в 2 ч.) / Ю.Г. Боровков, Д.В. Шалягин, А.В. Горелик и др. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2012.
18. Никитин Д.А. Повышение информативности системы интервального регулирования движения поездов АЛС-ЕН путём использования модульно взвешенного кода с суммированием // Автоматика на транспорте. 2017. Т. 3. № 4. С. 526–545.

19. Оленевич В.А., Власова Н.В. Оптимизация работы железнодорожных станций Восточного полигона в условиях внедрения современных систем организации движения поездов // Управление эксплуатационной работой на транспорте : сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2022. С. 103–108.

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 19.03.2019 № 466 (red. 13.10.2022) «Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO «RZHD» do 2025 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation. Federation dated March 19, 2019 No 466 (ed. October 13, 2022) «Long-term development program of JSC «Russian Railways» until 2025»]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201903210017> (Accessed January 20, 2023).
2. Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 15.04.2016 g. № 684r (red. 25.07.2022) «O vvode v deistvie tipovogo tekhnologicheskogo protsesssa upravleniya mestnoi rabotoi» [Order of JSC «Russian Railways» dated April 15, 2016 No 684r (ed. July 25, 2022) «On the commissioning of a standard technological process for managing local work»].
3. Prokop'eva E.S., Fomin S.A., Panin V.V. Opredelenie stantsionnykh i mezhpoezdnykh intervalov pri interval'nom regulirovanii dvizheniya poezdov [Determination of station and inter-train intervals during interval regulation of train traffic]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2017, no. 7, pp. 20–23.
4. OAO «RZHD» prodolzhit vnedrenie tekhnologii interval'nogo regulirovaniya (Elektronnyi resurs) [JSC «Russian Railways» will continue to introduce interval control technologies (Electronic resource)]. Available at: <https://avpt.ru/news/oao-rzhd-prodolzhit-vnedrenie-tekhnologiy-intervalnogo-regulirovaniya/> (Accessed February 16, 2023).
5. Rozenberg E.N., Anoshkin V.V. Perspektivy rosta propusknoi sposobnosti uchastka [Prospects for the growth of the site's capacity]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2020, no. 3, pp. 4–7.
6. Bel'kova Yu.D., Simochenko A.S., Belogolov Yu.I. Sovremennye sistemy interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Modern systems of interval regulation of train traffic]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no. 2 (12), pp. 97–102.
7. Kondrat'eva L.A. Sistemy regulirovaniya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte [Railway traffic control systems]. Moscow: UMTs ZhDT., 2016. 322 p.
8. Belogolov Yu.I., Stetsova Yu.M., Olentsevich A.A. Ispol'zovanie metodov matematicheskogo modelirovaniya pri upravlenii transportnymi protsessami na zheleznoi doroge [The use of mathematical modeling methods in the management of transport processes on the railway]. *Materialy Devyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the 9th International Scientific-Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, vol. 1, pp. 145–148.
9. Bel'kova Yu.D., Belogolov Yu.I. Postroenie grafika dvizheniya poezdov dlya uchastka Slyudyanka I – Ulan-Ude pri vnedrenii ABTTS-MSH [Construction of a train schedule for the Slyudyanka I – Ulan-Ude section with the introduction of the ABTC-MS]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no. 3 (13), pp. 109–117.
10. Akhmetshin A.R., Suslov K.V., Astashkov N.P., Olentsevich V.A., Shtaiger M.G., Karlina A.I. Development of the performance control algorithm of the blower motors of electric locomotives for various operating modes. *Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020) : IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Saint-Petersburg, 2020. DOI 10.1088/1757-899X/1111/1/012001.
11. Levin D.Yu. Dispetcherskie tsentry i tekhnologiya upravleniya perevozochnym protsessom [Dispatch centers and transportation process management technology]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 760 p.
12. Abramov A.A. Upravlenie ekspluatatsionnoi rabotoi. Ch. II. Grafik dvizheniya poezdov i propusknaya sposobnost' [Operational work management. Part II. Train schedule and capacity]. Moscow: RGOTUPS Publ., 2002. 171 p.
13. Makarov N.M. Analiz sistem interval'nogo regulirovaniya [Analysis of interval control systems]. *Trudy 79-i mezhdunarodnoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii RGUPS* [Proceedings of the 79th Student Scientific-Practical Conference of Rostov State Transport University]. Voronezh, 2020, vol. 3, pp. 39–41.
14. Dolgii A.I. Kontseptual'nyi podkhod k postroeniyu sovremennoi platformy upravleniya perevozochnym protsessom v OAO «RZHD» [Conceptual approach to the construction of a modern transportation process management platform in JSC «Russian Railways»]. *Trudy AO «NILAS»* [Proceedings of JSC «Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport»], 2021, vol. 1, no. 11, pp. 9–31.
15. Ratobyl'skaya D.V. Puti povysheniya propusknoi sposobnosti uchastkov zheleznodorozhnoi seti na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Ways to increase the capacity of sections of the railway network based on simulation modeling]. *Matematicheskie mashiny i sistemy* [Mathematical machines and systems], 2010, no. 2, pp. 116–121.
16. Romyantsev S.V. Tekhnicheskie sredstva interval'nogo regulirovaniya [Technical means of interval regulation]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2019, no. 5, pp. 39–42.
17. Borovkov Yu.G., Shalyagin D.V., Gorelik A.V., Mitrokhin V.E., Nevarov P.A., Trebina E.G., Chernousova V.S., Bychkov E.D., Batrakov S.A., Kovalenko O.N., Kuz'menko G.A. Sistemy zheleznodorozhnoi avtomatiki, telemekhaniki i svyazi (v 2 ch.) [Railway automation, telemechanics and communication systems (in 2 parts)]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2012.
18. Nikitin D.A. Povyshenie informativnosti sistemy interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov ALS-EN putem ispol'zovaniya modul'no vzveshennogo koda s summirovaniem [Increasing the informativeness of the ALS-EN train interval control system by using a modularly weighted code with summation]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2017, vol. 3, no. 4, pp. 526–545.
19. Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Optimizatsiya raboty zheleznodorozhnykh stantsii vostochnogo poligona v usloviyakh vnedreniya sovremennykh sistem organizatsii dvizheniya poezdov [Optimization of the operation of the railway stations of the Eastern Polygon in the context of the introduction of modern systems for organizing train traffic]. *Sbornik trudov Mezhdunarod-*

noi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Upravlenie ekspluatatsionnoi rabotoi na transporte» [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Management of operational work in transport »]. Saint-Petersburg, 2022, pp. 103–108.

Информация об авторах

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

Information about the authors

Yurii I. Belogolov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operational Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: belogolov_yi@irgups.ru.

Ранжирование клиентов контейнерного терминала в целях увеличения доли переработки контейнеров по «прямому» варианту

Д.Ю. Гришкова✉

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Российская Федерация

✉raigas@inbox.ru

Резюме

В статье рассмотрен контейнерный терминал N, который включает четыре контейнерные площадки. Сравнивается суммарная фактическая перерабатывающая способность контейнерных площадок с требуемой в соответствии с прогнозными значениями. Установлено, что уже к 2023 г. фактическая перерабатывающая способность не сможет обеспечить стабильную и бесперебойную работу контейнерного терминала. В связи с географическими особенностями расположения терминала (в месте его дислокации преобладают сильные ветра) количество ярусов хранения контейнеров в штабеле имеет ограничения. В исследовании с целью повышения перерабатывающей способности терминала даны следующие предложения: увеличение доли местных контейнеров, перерабатываемых по «прямому» варианту; внедрение системы видеораспознавания вагонов и контейнеров на подъездных путях; использование системы рационального размещения прибывающих контейнеров. Для того чтобы выработать стратегию работы терминала по «прямому» варианту были определены ключевые клиенты посредством ABC- и XYZ-анализа. Первый учитывает объемы выполняемых работ с контейнерами, он предполагает использование правила Парето. К группе А относится 20 % клиентов из общего числа с наибольшими объемами работы. В рассмотренной ситуации это первые 18 клиентов. Группа В имеет срединные значения объемов переработки. К группе С относятся клиенты с наименьшим количеством переработки контейнеропотока. Метод XYZ позволяет произвести классификацию клиентов в зависимости от вариабельности значений объемов ереработки. К наиболее значимым клиентам относятся клиенты группы Х со стабильными объемами контейнеропотока. Исходя из выполненных расчетов, определен процент клиентов, относящихся к группам «АХ» и «АУ», с которыми необходимо работать по «прямому» варианту. С целью увеличения процента контейнеров, перерабатываемых по «прямому» варианту, приведены рекомендации по разработке контактного графика для одновременного подвода автотранспорта и железнодорожных вагонов, а также по использованию программных продуктов и цифровых технологий.

Ключевые слова

контейнерный терминал, перерабатывающая способность, ABC- и XYZ-анализ, «прямой» вариант работы, правило Парето, ключевые клиенты

Для цитирования

Гришкова Д.Ю. Ранжирование клиентов контейнерного терминала в целях увеличения доли переработки контейнеров по «прямому» варианту / Д.Ю. Гришкова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 106–115. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).106-115.

Информация о статье

поступила в редакцию: 6.02.2023 г.; поступила после рецензирования: 20.03.2023 г.; принята к публикации: 21.03.2023 г.

Ranking of container terminal customers in order to increase the share of container processing by the «direct» version

D.Yu. Grishkova✉

Siberian Transport University, Novosibirsk, the Russian Federation

✉raigas@inbox.ru

Abstract

The article considers container terminal N, which includes four container platforms. The total actual processing capacity of container sites is compared with the required one according to the forecast values. It is established that by 2023 the actual processing capacity will not be able to ensure stable and uninterrupted operation of the container terminal. Due to the geographical features of the terminal location, (strong winds prevail at the location), the number of tiers of container storage in the stack has limitations. In order to increase the processing capacity of the terminal, the following proposals were made: increasing the share of local containers processed by the "direct" option, introducing a video recognition system for wagons and containers on access roads, using a system of rational placement of arriving containers. In order to develop a strategy for working on the «direct» option, key clients were identified through ABC- and XYZ-analyses. ABC analysis takes into account the volume of work performed with containers. ABC analysis involves the use of the Pareto

rule. Group A includes 20 % of the total number of clients with the largest volumes of work. In the considered situation, these are the first 18 clients. Group B has average values of processing volumes. Group C includes customers with the least amount of container traffic processing. The XYZ method allows to classify customers depending on the variability of the values of their processing volumes. The most significant clients are Group X clients with stable volumes of container traffic. Based on the calculations performed, the percentage of clients belonging to the «AX» and «AY» groups with whom it is necessary to work by the "direct" option is determined. In order to increase the percentage of containers processed by the direct option, the article provides recommendations for the development of a contact schedule for the simultaneous supply of motor vehicles and railway wagons, as well as the full use of software products and digital technologies.

Keywords

container terminal, processing capacity, ABC- and XYZ-analyses, the «direct» version of the work, Pareto rule, key customers

For citation

Grishkova D.Yu. Ranzhirovanie klientov konteinerного терминала v tselyakh uvelicheniya doli pererabotki konteinerov po «pryamomu» variantu [Ranking of container terminal customers in order to increase the share of container processing by the «direct» version]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 106–115. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).106-115.

Article info

Received: February 6, 2023; Revised: March 20, 2023; Accepted: March 21, 2023.

Введение

Контейнерный терминал N входит в четверку крупных терминалов в узле N. Он включает четыре контейнерные площадки по переработке крупнотоннажных контейнеров, оснащенные ричстакерами и козловыми кранами [1, 2] Настоящая перерабатывающая способность терминала составляет порядка 213 тыс. контейнеров в двадцатифутовом эквиваленте (ДФЭ) [3]. Прогнозируемые объемы на 2023 г. составят 261 ДФЭ в год [4, 5].

Сравнивая текущую перерабатывающую способность с прогнозируемым суммарным контейнеропотоком, можно сделать вывод, что уже к 2023 г. фактическая перерабатывающая способность не сможет обеспечить стабильную и бесперебойную работу контейнерного терминала [6, 7].

Таким образом, в ходе выполненных расчетов была выявлена потребность в повышении перерабатывающей способности контейнерного терминала по вместимости контейнерных площадок [8, 9]. Из-за географических особенностей, включающих в себя сильные ветра на территории контейнерного терминала, количество ярусов хранения контейнеров в штабеле имеет ограничения и используется по максимуму [10]. Исходя из изложенного, можно наметить ряд мероприятий, направленных на увеличение перерабатывающей способности контейнерного терминала. К ним относятся: увеличение доли местных контейнеров, перерабатываемых по «прямому» варианту, внедрение системы видеораспознавания вагонов и

контейнеров на подъездных путях, а также использование системы рационального размещения прибывающих контейнеров. Под «прямым» вариантом переработки контейнеров подразумевается их перегрузка из вагона в автомобиль или из автомобиля в вагон, минуя склад. «Прямой» вариант переработки контейнеров целесообразно применять для ключевых клиентов контейнерного терминала [11, 12].

ABC-анализ

Для определения ключевых клиентов применяется объединенный ABC – XYZ-анализ.

Метод ABC-анализа основан на принципе Парето: «за большинство возможных результатов отвечает относительно небольшое число причин» [13, 14]. Смысл ABC-анализа состоит в том, чтобы классифицировать клиентов на три категории: А, В, С. К категории А принадлежат наиболее важные клиенты, а к категории С – наименее важные. «Важность» клиента определяется по признаку наибольшего объема перевозок. На клиентов категории А приходится 80 % всех перевозок, группы В – 15 %, группы С – 5 %. На основании данных по объемам контейнерных перевозок 40 ключевых клиентов за 2021 г., представленных в табл. 1, выполнено ранжирование клиентов по группам. Итоговые результаты представлены в табл. 2.

Таким образом, к группе А относят клиентов 1–18. Для наглядности результатов ABC-анализ представлен в виде графика на рис. 1.

Таблица 1. Объемы контейнерных перевозок ключевых клиентов по кварталам
Table 1. Container traffic volumes of key customers by quarter

Клиент Client	Объем переработанных контейнеров, двадцатифутовый эквивалент Volume of recycled containers, twenty-foot equivalent				
	1 квартал 1 st quarter	2 квартал 2 nd quarter	3 квартал 3 ^d quarter	4 квартал 4 th quarter	Итого Total
1	562	1 897	7 808	8 035	18 302
2	–	–	8 027	6 996	15 023
3	1 786	920	5 267	5 271	13 244
4	1 804	2 323	3 361	3 798	11 286
5	2 152	2 201	2 531	2 921	9 805
6	545	392	3 144	2 636	6 717
7	1 412	1 641	1 838	1 563	6 454
8	1 351	1 950	1 700	1 337	6 338
9	454	403	1 666	2 767	5 290
10	656	1 269	1 146	1 242	4 313
11	462	1 012	1 044	1 630	4 148
12	712	849	752	1 212	3 525
13	430	907	699	885	2 921
14	496	542	531	840	2 409
15	174	403	864	932	2 373
16	–	–	944	1 419	2 363
17	937	1 191	100	98	2 326
18	–	412	770	970	2 152
19	446	328	530	723	2 027
20	344	554	650	467	2 015
21	498	485	408	584	1 975
22	248	238	566	766	1 818
23	38	262	132	1 346	1 778
24	992	681	84	–	1 757
25	245	416	559	463	1 683
26	331	494	491	255	1 571
27	504	412	8	544	1 468
28	–	–	–	1 387	1 387
29	230	398	401	268	1 297
30	10	521	410	355	1 296
31	319	386	411	165	1 281
32	395	246	410	159	1 210
33	137	152	419	465	1 173
34	350	253	194	347	1 144
35	197	347	332	266	1 142
36	91	233	484	245	1 053
37	311	216	260	251	1 038
38	–	10	548	464	1 022
39	338	269	272	132	1 011
40	117	58	235	593	1 003

Таблица 2. ABC-анализ ключевых клиентов

Table 2. ABC analysis of key clients

Клиент Client	Количество переработанных контейнеров, двадцатифутовый эквивалент Number of processed containers, twenty-foot equivalent	Доля переработанных контейнеров клиента, % Proportion of recycled customer containers, %	Доля переработанных контейнеров клиента нарастающим итогом, % Proportion of recycled customer containers on a cumulative basis, %	Группа Group
1	18 302	12,1901	12,1901	A
2	15 023	10,0061	22,1962	A
3	13 244	8,82122	31,0175	A
4	11 286	7,51708	38,5345	A
5	9 805	6,53066	45,0652	A
6	6 717	4,47388	49,5391	A
7	6 454	4,29871	53,8378	A
8	6 338	4,22145	58,0593	A
9	5 290	3,52343	61,5827	A
10	4 313	2,87269	64,4554	A
11	4 148	2,76279	67,2182	A
12	3 525	2,34784	69,566	A
13	2 921	1,94554	71,5115	A
14	2 409	1,60452	73,1161	A
15	2 373	1,58055	74,6966	A
16	2 363	1,57389	76,2705	A
17	2 326	1,54924	77,8197	A
18	2 152	1,43335	79,2531	A
19	2 027	1,35009	80,6032	B
20	2 015	1,3421	81,9453	B
21	1 975	1,31546	83,2607	B
22	1 818	1,21089	84,4716	B
23	1 778	1,18424	85,6559	B
24	1 757	1,17026	86,8261	B
25	1 683	1,12097	87,9471	B
26	1 571	1,04637	88,9935	B
27	1 468	0,97777	89,9712	B
28	1 387	0,92382	90,895	B
29	1 297	0,86387	91,7589	B
30	1 296	0,86321	92,6221	B
31	1 281	0,85322	93,4753	B
32	1 210	0,80593	94,2813	B
33	1 173	0,78128	95,0625	C
34	1 144	0,76197	95,8245	C
35	1 142	0,76063	96,5851	C
36	1 053	0,70135	97,2865	C
37	1 038	0,69136	97,9779	C
38	1 022	0,68071	98,6586	C
39	1 011	0,67338	99,3319	C
40	1 003	0,66805	100	C
Итого	150 138	100		



Рис. 1. ABC-анализ клиентов
Fig. 1. ABC customer analysis

XYZ-анализ

Метод XYZ-анализа позволяет произвести классификацию клиентов в зависимости от стабильности объемов их перевозок. Чем стабильнее объемы перевозок клиента, тем он «важнее». При проведении XYZ-анализа осуществляется группировка в порядке возрастания коэффициента вариации, который характеризует степень отклонения спроса на перевозки от среднего значения. К группе X относят клиентов, которые характеризуются стабильными объемами перевозок. К группе Y относятся клиенты, чьи объемы перевозок имеют относительно небольшие колебания либо выраженную сезонность. Группа Z характеризуется нерегулярными объемами перевозок. Коэффициент вариации рассчитывается следующим образом:

$$x = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}}{\bar{x}} \cdot 100\%$$

где x_i – значение объема перевозок в i -ом квартале по оцениваемой позиции; \bar{x} – среднемесячное значение объема перевозок; n – количество кварталов, по которым проводится оценка (9,52 %) [15].

Для анализа клиентов в качестве классификационного признака принят объем квартальных перевозок. Анализ производится по четырем кварталам.

Расчетные значения коэффициента вариации, ранжирование клиентов в порядке возрастания значения коэффициента вариации, разбиение по группам представлены в табл. 3.

Границы коэффициента вариации для разбивки на группы принимают следующие значения:

- группа X – от 0 до 15 %;
- группа Y – от 15 до 30 %;
- группа Z – свыше 30 %.

Таблица 3. XYZ-анализ ключевых клиентов

Table 3. XYZ-analysis of key clients

Клиент Client	Объем перевезенных контейнеров, двадцатифутовый эквивалент Volume of recycled containers, twenty-foot equivalent					Коэффициент вариации Variation coefficient	Группа Group
	1 квартал 1 st quarter	2 квартал 2 nd quarter	3 квартал 3 rd quarter	4 квартал 4 th quarter	За год For a year		
1	2	3	4	5	6	7	8
28	0	0	0	1 387	1 387	0	X
2	–	–	8 027	6 996	15 023	6,86	X
7	1 412	1 641	1 838	1 563	6 454	9,52	X

Продолжение таблицы 3

Table 3 continued

1	2	3	4	5	6	7	8
5	2 152	2 201	2 531	2 921	9 805	12,56	X
21	498	485	408	584	1 975	12,65	X
37	311	216	260	251	1 038	13,09	X
8	1 351	1 950	1 700	1 337	6 338	16,17	Y
16	–	–	944	1 419	2 363	20,10	Y
35	197	347	332	266	1 142	20,84	Y
20	344	554	650	467	2 015	22,37	Y
12	712	849	752	1 212	3 525	22,39	Y
14	496	542	531	840	2 409	22,97	Y
10	656	1 269	1 146	1 242	4 313	23,00	Y
34	350	253	194	347	1 144	23,04	Y
29	230	398	401	268	1 297	23,58	Y
13	430	907	699	885	2 921	26,19	Y
26	331	494	491	255	1 571	26,30	Y
25	245	416	559	463	1 683	27,05	Y
4	1 804	2 323	3 361	3 798	11 286	28,18	Y
19	446	328	530	723	2 027	28,42	Y
39	338	269	272	132	1 011	29,66	Y
31	319	386	411	165	1 281	29,89	Y
18	0	412	770	970	2 152	32,18	Z
32	395	246	410	159	1 210	34,63	Z
11	462	1 012	1 044	1 630	4 148	39,85	Z
22	248	238	566	766	1 818	49,07	Z
33	137	152	419	465	1 173	51,06	Z
15	174	403	864	932	2 373	53,31	Z
36	91	233	484	245	1 053	53,60	Z
27	504	412	8	544	1 468	57,96	Z
30	10	521	410	355	1 296	58,92	Z
3	1 786	920	5 267	5 271	13 244	59,85	Z
6	545	392	3 144	2 636	6 717	72,96	Z
9	454	403	1 666	2 767	5 290	73,74	Z
1	562	1 897	7 808	8 035	18 302	73,87	Z
40	117	58	235	593	1 003	82,80	Z
17	937	1 191	100	98	2 326	84,40	Z
24	992	681	84	0	1 757	94,08	Z

Окончание таблицы 3

End of table 3

38	0	10	548	464	1 022	98,74	Z
23	38	262	132	1 346	1 778	118,45	Z

Таким образом, к группе X относятся клиенты 28, 2, 7, 5, 21 и 37.

Объединим ABC-анализ с XYZ-анализом и представим их для большей наглядности в виде матрицы (рис. 2).

мых контейнеров по «прямому» варианту (перегрузка контейнеров с вагона на автомобиль и наоборот, минуя площадку) составляет 5 %. При внедрении «прямого» варианта для переработки контейнеров ключевых клиентов, относящихся к



Рис. 2. Матрица ABC-XYZ-анализа клиентов

Fig. 2. ABC-XYZ matrix of customer analysis

Исходя из выполненных расчетов и сравнения двух методов анализа клиентов, можно сделать вывод, что наиболее «важными» клиентами считаются клиенты, принадлежащие к группам AX и AY – клиенты 28, 2, 5, 7, 4, 8, 10, 12, 13, 14, 16, на них приходится наибольшая доля перевозок с высоким уровнем стабильности. Для таких клиентов целесообразно разработать «прямой» вариант переработки контейнеров на терминале.

Расчет доли контейнеров, перерабатываемых по «прямому» варианту, после ранжирования клиентов по двум методам

На данный момент доля перерабатываемых

группам AX и AY, доля таких контейнеров увеличится [16]. Для того чтобы определить искомое значение увеличения, необходимо вычислить какую долю по объемам перевозок клиенты категорий AX и AY составляют от общего числа прибывающих и отправляемых контейнеров за 2021 г. Доля клиентов AX и AY по объемам перевозки контейнеров находится как

$$\alpha = \frac{Q_{AX+AY}}{Q},$$

где Q_{AX+AY} – объемы перевозок, приходящиеся на клиентов группы «AX» и «AY», ДФЭ; Q – суммарные объемы перевозок контейнеров в 2021 г. по всем клиентам, 196 307 ДФЭ.

$$Q_{AX+AY} = (1\ 387 + 15\ 023 + 9\ 805 + 6\ 454) + \\ + (11\ 286 + 6\ 338 + 4\ 313 + 3\ 525 + 2\ 921 + 2\ 409 \\ + 2\ 363) = 65\ 824 \text{ ДФЭ.} \\ \alpha = \frac{65\ 824}{196\ 307} = 0,34.$$

Заключение

Зная долю ключевых клиентов и учитывая, что «прямой» вариант переработки распределен между клиентами равномерно, определим какой процент контейнеров, перерабатываемых по «прямому» варианту, приходится на клиентов групп АХ и АУ.

Количество контейнеров, перерабатываемых по «прямому» варианту в настоящее время:

$$Q_{\text{пр}} = 0,05 \cdot Q,$$

где 0,05 – доля контейнеров, перерабатываемых по «прямому» варианту:

$$Q_{\text{пр}} = 0,05 \cdot 196\ 307 = 9\ 815 \text{ ДФЭ.}$$

Требуемое количество контейнеров, которые необходимо перерабатывать по «прямому» варианту, согласно выполненным расче-

там, составляет 65 824 ДФЭ. Следовательно, в целях увеличения количества контейнеров, перерабатываемых по «прямому» варианту, необходимо разработать контактный график для одновременного подвода автотранспорта и железнодорожных вагонов [17]. Кроме того, повысить долю «прямого» варианта позволит использование программного продукта «Интеллектуальный контейнерный терминал», а также другие цифровые технологии [18–20]. Количество контейнеров, которые дополнительно должны перегружаться по «прямому» варианту, составит:

$$Q_{\text{пр}}^{\text{кл}} = Q_{AX+AY} - Q_{\text{пр}},$$

$$Q_{\text{пр}}^{\text{кл}} = 65\ 824 - 9\ 815 = 56\ 009 \text{ ДФЭ,}$$

или выше на долю, равную 0,29, что примерно составит увеличение на 154 ДФЭ в сутки в отличие от существующей технологии, где количество контейнеров, перегружаемых по «прямому» варианту, в среднем в сутки составляет 27 ДФЭ.

Список литературы

1. Алешина А. Контейнеризация в России переживает эпоху развития // РЖД-Партнер.Ру : сайт. URL : <https://www.rzd-partner.ru/logistics/interview/konteynerizatsiya-v-rossii-perezhiwaet-epokhu-razvitiya> (Дата обращения 10.01.2023).
2. Покровская О.Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 26–32.
3. Прокофьева Т.А., Ювица В.Н. Создание опорной сети логистических центров на основных направлениях товародвижения в системе международных транспортных коридоров // Транспорт: наука, техника, управление. 2007. № 8. С. 62–65.
4. Гришкова Д.Ю. Методы прогнозирования размеров погрузки на железнодорожном объекте // Скиф. Вопросы студенческой науки. 2020. № 3 (43). С. 74–80.
5. Гришкова Д.Ю. Анализ транспортно-логистической инфраструктуры Новосибирской области // Глобальная экономика в XXI веке: роль биотехнологий и цифровых технологий : сб. науч. ст. по итогам работы второго круглого стола с междунар. участием. М., 2020. С. 170–172.
6. Покровская О.Д. Логистический накопительно-распределительный центр как инфраструктурная основа международных транспортных коридоров // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 12-1. С. 118–121.
7. Псеровская Е.Д., Кагадий И.Н. Оценка влияния основных параметров грузовой станции на ее перерабатывающую способность // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2017. № 1 (40). С. 19–29.
8. Оленцевич В.А., Зюванова А.О., Ефимов В.О. Совершенствование организации работы системы контейнерных терминалов железнодорожного транспорта // Байкальская наука: идеи, инновации, инвестиции : сб. ст. по материалам всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2022. Т. 2. С. 158–163.
9. Седашкин А.Д. Управление качеством продукции на основе статистического моделирования процесса расчета выборок // Наука и молодежь : XIX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Барнаул, 2022. Т. 1. Ч. 1. С. 53–54.
10. Псеровская Е.Д., Грешенштейн А.П. Расположение городского распределительного центра: научно-методологический подход // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2021. № 3 (83). С. 131–140.
11. Боровская Ю.С., Зыкова В.Ю., Попов В.Н. Расчет объема перегрузки грузов по прямому варианту с речного транспорта на железнодорожный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. № 1-2. С. 11–13.
12. Грешенштейн А.П. Обоснование целесообразности создания распределительного центра в условиях взаимодействия разных видов транспорта // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 1 (60). С. 68–75.
13. Калимулина З.А. Правило Парето как способ оценки деятельности // Аллея науки. 2019. Т. 4. № 1 (28). С. 46–48.
14. Собко М.В. ABC-анализ как инструмент анализа результатов управления ассортиментом в категорийном менеджменте // Вопросы экономики и управления. 2018. № 1 (12). С. 22–25.
15. Погребцова Е.А. Управление товарным ассортиментом на основе ABC-анализа и XYZ - анализа // Актуальные вопросы современной экономики. 2021. № 12. С. 148–157.
16. Гришкова Д.Ю. Определение перерабатывающей способности терминала при различных условиях работы // За-

метки ученого. 2021. № 1. С. 30–34.

17. Джиоев А.З. Инновации в системах управления контейнерными терминалами // Системный анализ и логистика. 2013. № 10. С. 4–8.

18. Солнцев А. Роль умной пломбы в цифровой экономике России // РЖД-Партнер.Ру : сайт. URL : <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/interview/rol-umnoy-plombu-v-tsifrovoyu-ekonomike-rossii/> (Дата обращения 10.01.2023).

19. Гришкова Д.Ю., Корнеев М.В. Развитие электронных сервисов для контейнерных перевозок // Политранспортные системы : материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2020. С. 705–709.

20. Лазарев А. Контейнерные перевозки с полным цифровым трекингом // РЖД-Партнер.Ру : сайт. URL : <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/interview/konteynerye-perevozki-s-polnym-tsifrovym-trekingom/> (Дата обращения 10.01.2023).

References

1. Konteinerizatsiya v Rossii perezhivaet epokhu razvitiya (elektronnyi resurs) [Containerization in Russia is experiencing an era of development (electronic resource)]. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/logistics/interview/konteynerizatsiya-v-rossii-perezhivaet-epokhu-razvitiya/> (Accessed January 10, 2023).

2. Pokrovskaya O.D. Kompleksnaya otsenka transportno-skladskikh sistem [Comprehensive assessment of transport and storage systems]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2019, no. 7, pp. 26–32.

3. Prokof'eva T.A., Yuvitsa V.N. Sozdanie opornoj seti logisticheskikh tsentrov na osnovnykh napravleniyakh tovarodvizheniya v sisteme mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Creation of a support network of logistics centers in the main directions of goods movement in the system of international transport corridors]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific Information Proceedings], 2007, no. 8, pp. 62–65.

4. Grishkova D.Yu. Metody prognozirovaniya razmerov pogruzki na zheleznodorozhnom ob''ekte [Methods of predicting the size of loading at a railway facility]. *Skif. Voprosy studencheskoi nauki* [Skif. Questions of student science], 2020, no. 3 (43), pp. 74–80.

5. Grishkova D.Yu. Analiz transportno-logisticheskoi infrastruktury Novosibirskoi oblasti [Analysis of the transport and logistics infrastructure of the Novosibirsk region]. *Sbornik nauchnykh statei po itogam raboty vtorogo stolika s mezhdunarodnym uchastiem «Global'naya ekonomika v XXI veke: rol' biotekhnologii i tsifrovyykh tekhnologii»* [Proceedings of scientific articles based on the results of the second round table with international participation «The Global Economy in the XXI century: the role of biotechnologies and digital technologies»]. Moscow, 2020, pp. 170 – 172.

6. Pokrovskaya O.D. Logisticheskii nakopitel'no-raspredeitel'nyi tsentr kak infrastruktural'naya osnova mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Logistics storage and distribution center as the infrastructural basis of international transport corridors]. *Aktual'nye problemy gumanitarnyykh i estestvennykh nauk* [Actual problems of humanities and natural sciences], 2013, no. 12-1, pp. 118–121.

7. Pserovskaya E.D., Kagadii I.N. Otsenka vliyaniya osnovnykh parametrov gruzovoi stantsii na ee pererabatyvayushchuyu sposobnost' [Assessment of the impact of the main parameters of the cargo station on its processing capacity]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2017, no. 1 (40), pp. 19–29.

8. Olentsevich V.A., Zyuvanova A.O., Efimov V.O. Sovershenstvovanie organizatsii raboty sistemy konteynernykh terminalov zheleznodorozhnogo transporta [Improving the organization of the railway container terminal system]. *Sbornik statei po materialam vsrossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Baikal'skaya nauka: idei, innovatsii, investitsii»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference «Baikal science: ideas, innovations, investments»]. Irkutsk, 2022, vol. 2, pp. 158–163.

9. Sedashkin A.D. Upravlenie kachestvom produktsii na osnove statisticheskogo modelirovaniya protsessa rascheta vyborok [Product quality management based on statistical modeling of the sample calculation process]. *XIX Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchennykh «Nauka i molodezh'»* [Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Ph.D. students and Young Scientists «Science and youth»]. Barnaul, 2022, vol. 1, part 1, pp. 53–54.

10. Pserovskaya, E.D., Grefenshtein A.P. Raspolozhenie gorodskogo raspredelitel'nogo tsentra: nauchno-metodologicheskii podkhod [Location of the urban distribution center: scientific and methodological approach]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2021, no. 3 (83), pp. 131–140.

11. Borovskaya Yu.S., Zykova V.Yu., Popov V.N. Raschet ob''ema peregruzki gruzov po pryamomu variantu s rechnogo transporta na zheleznodorozhnyi [Calculation of the volume of cargo transshipment according to the direct variant from river transport to railway]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport of Siberia and the Far East], 2017, no. 1-2, pp. 11–13.

12. Grefenshtein A.P. Obosnovanie tselesoobraznosti sozdaniya raspredelitel'nogo tsentra v usloviyakh vzaimodeistviya raznykh vidov transporta [Justification of the feasibility of creating a distribution center in the conditions of interaction of different modes of transport]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2022, no. 1 (60), pp. 68–75.

13. Kallimulina Z.A. Pravilo Pareto kak sposob otsenki deyatelnosti [Pareto rule as a way to evaluate activities]. *Alleya nauki* [The Alley of Science], 2019, vol. 4, no. 1 (28), pp. 46–48.

14. Sobko M.V. ABS-analiz kak instrument analiza rezul'tatov upravleniya assortimentom v kategoriinom menedzhmente [ABC-analysis as a tool for analyzing the results of assortment management in category management]. *Voprosy ekonomiki i upravleniya* [Issues of Economics and Management], 2018, no. 1 (12), pp. 22–25.

15. Pogrebtsova E.A. Upravlenie tovarnym assortimentom na osnove ABS-analiza i XYZ-analiza [Product assortment man-

agement based on ABC analysis and XYZ analysis]. *Aktual'nye voprosy sovremennoi ekonomiki* [Current issues of the modern economy], 2021, no. 12, pp. 148–157.

16. Grishkova D.Yu. Opredelenie pererabatyvayushchei sposobnosti terminala pri razlichnykh usloviyakh raboty [Determination of the processing capacity of the terminal under various operating conditions]. *Zametki uchenogo* [Notes of the scientist]. 2021, no. 1, pp. 30–34.

17. Dzhiyev A.Z. Innovatsii v sistemakh upravleniya konteynernymi terminalami [Innovations in container terminal management systems]. *Sistemnyi analiz i logistika* [System analysis and logistics], 2013, no. 10, pp. 4–8.

18. Rol' umnoi plomby v tsifrovoy ekonomike Rossii (elektronnyi resurs) [The role of a smart seal in the digital economy of Russia (electronic resource)]. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/interview/rol-umnoy-plomby-v-tsifrovoy-ekonomike-rossii/> (Accessed January 10, 2023).

19. Grishkova D.Yu., Korneev M.V. Razvitie elektronnykh servisov dlya konteynernykh perezozok [Development of electronic services for container transportation]. *Materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Polytransportnye sistemy»* [Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference «Polytransport systems»]. Novosibirsk, 2020, pp. 705 – 709.

20. Konteynerye perezozki s polnym tsifrovym trekingom (elektronnyi resurs) [Container transportation with full digital tracking (electronic resource)]. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/interview/konteynerye-perezozki-s-polnym-tsifrovym-trekingom/> (Accessed January 10, 2023).

Информация об авторах

Гришкова Диана Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры логистики, коммерческой работы и подвижного состава, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск; e-mail: raigas@inbox.ru.

Information about the authors

Diana Yu. Grishkova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Logistics, Commercial Work and Rolling Stock, Siberian Transport University, Novosibirsk; e-mail: raigas@inbox.ru.

Анализ проблемы износа в зоне контакта «пятник – подпятник» грузового подвижного состава и пути ее минимизации

Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, А.В. Ромашов, С.В. Трескин✉

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

✉sergei.tresckin@yandex.ru

Резюме

На сегодняшний день в конструкциях подвижного состава железнодорожного транспорта активно используются узлы трения. Детали, из которых состоят указанные узлы, эксплуатируются в достаточно тяжелых условиях, поэтому существует необходимость изучения процессов, протекающих в них. В исследовании рассмотрены узлы трения на примере взаимного влияния друг на друга элементов грузовой тележки модели 18-100, где одним из главных является узел «пятник – подпятник». Проанализировано взаимодействие пятника и подпятника, вертикальные и горизонтальные усилия, возникающие в результате контакта этих элементов. Изучена конструкция наиболее распространенного пятникового узла. В результате были выявлены наиболее важные достоинства и недостатки используемого пятникового узла и рассмотрены основные дефекты и повреждения пятника и подпятника, проявляющиеся в ходе эксплуатации данного узла. Различные процессы, возникающие при движении подвижного состава, такие как вписывание в кривые участки пути, перевалка кузова вагона, выдавливание смазки из-под пятника, являются наиболее частыми причинами интенсивного износа опорной и упорной поверхностей пятника и подпятника. В итоге был сделан вывод, что одной из основных проблем, обнаруживаемых при эксплуатации стандартного пятникового узла, является износ опорной и упорной поверхностей. Кроме того, в работе изучены пятниковые узлы других конструкций, предложенные способы снижения износа опорной и упорной поверхностей пятника и подпятника. Выявлены плюсы и минусы каждого решения. В качестве результата проведенного исследования выступает оформленная классификация используемых методов снижения износа в пятниковом узле.

Ключевые слова

узел трения, износ, пятник, подпятник, пятниковый узел, коэффициент трения, износостойкость, антифрикционное покрытие

Для цитирования

Анализ проблемы износа в зоне контакта «пятник – подпятник» грузового подвижного состава и пути ее минимизации / Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, А.В. Ромашов, С.В. Трескин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 116–126. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).116-126.

Информация о статье

поступила в редакцию: 13.01.2023 г.; поступила после рецензирования: 18.01.2023 г.; принята к публикации: 19.01.2023 г.

Analysis of the problem of wear in the contact zone «centre plate – thrust bearing» of freight rolling stock and ways to minimize it

E.Yu. Dul'skii, P.Yu. Ivanov, A.V. Romashov, S.V. Treskin✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉sergei.tresckin@yandex.ru

Abstract

To date, friction units are actively used in the structures of railway rolling stock. The parts that make up these nodes are operated in rather severe conditions, so there is a need to study the processes that occur in these nodes. Friction nodes are considered on the example of the interaction of a bogie model 18-100 elements, with one of the main elements being the «center plate-thrust bearing» node. The interaction of a centre pivot and a truck central bearing, vertical and horizontal efforts arising as a result of this interaction are analyzed. The design of the most common centre pivot node has been studied. As a result, the main advantages and disadvantages of the used centre pivot node were identified and the main defects and damages of the center plate and the thrust bearing arising during the operation of the center plate node were considered. Various processes that occur during the movement of rolling stock, such as: fitting into curved sections of the track, transshipment of the wagon body, squeezing grease from under the center plate, are one of the reasons for the intensive wear of the support and thrust surfaces of the center plate and the thrust bearing. It was concluded that one of the main problems encountered during the operation of a standard center plate unit is the wear of the support and thrust surfaces. The center plate nodes of other structures have been studied, as well as the proposed ways to reduce the wear of the support and thrust surfaces of the center plate and thrust bearing. The advantages and disadvantages of each proposed solution are revealed. The result of the study is a formal classification of the methods used to reduce wear in the center plate node.

Keywords

friction unit, wear, center plate, thrust bearing, center plate node, coefficient of friction, wear resistance, anti-friction coating

For citation

Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Romashov A.V., Treskin S.V. Analiz problemy iznosa v zone kontakta «pyatnik – podpyatnik» gruzovogo podvizhnogo sostava i puti ee minimizatsii [Analysis of the problem of wear in the contact zone «centre pivot – truck central bearing» of freight rolling stock and ways to minimize it]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77). pp. 116–126. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).116-126.

Article Info

Received: January 13, 2023; Revised: January 18, 2023; Accepted: January 19, 2023.

Введение

В различных отраслях машиностроения на сегодняшний день широко применяются узлы трения. Не является исключением и железнодорожный транспорт, где узлы трения повсеместно распространены. К данным узлам предъявляются значительные требования по надежности и прочности. Для выполнения подобных требований необходимы знания о свойствах используемых материалов, силах, возникающих в данных узлах, и т.д. [1].

Узлы трения в подвижном составе работают в сложных условиях. К этим условиям можно отнести широкий спектр воспринимаемых нагрузок, приводящий к интенсивному износу контактирующих поверхностей, в том числе возможное отсутствие смазки и наличие абразива снижает эффективность работы данных узлов. Поэтому данным узлам и деталям подвижного состава уделяется особое внимание, так как их работа оказывает значительное влияние на обеспечение безопасности пассажиров и сохранность грузов [2].

Рассмотрим узлы трения на примере взаимодействия различных элементов в тележке модели 18-100. Тележка модели 18-100 (ЦНИИ-ХЗ) (в том числе ее различные модификации) является самой распространенной на железных дорогах России и в странах СНГ. В этой тележке гашение колебаний, возникающих при движении вагона, происходит благодаря появлению сил трения в узлах сухого трения. К этим узлам в тележке можно отнести: фрикционные клинья, скользуны, буксовые проемы в боковых рамах, пятниковый узел.

Указанные силы создают моменты сопротивления движению, препятствующие вписыванию тележек в кривые участки пути. Моменты трения зависят от формы пятникового узла, перевалки кузова, положения скользунов, а также от коэффициента трения. На коэффициент трения оказывают влияние трибологиче-

ские параметры материалов, из которых изготовлены взаимодействующие детали. Например, для пары трения «сталь – сталь» и «сталь – чугун» его значение может колебаться от 0,25 до 0,4 [3].

Вписывание тележек в кривые происходит посредством силового взаимодействия боковой поверхности головки рельсов с поверхностью катания колесной пары и гребнями колес подвижного состава. Данное взаимодействие, при отклонении параметров рельсошпальной решетки от допустимых и изменении профиля катания колесной пары (дефекты поверхности катания), приводит к трению поверхности гребня колесной пары о боковую поверхность головки рельса с выделением теплоты и износом контактирующих поверхностей.

Одним из последствий этих процессов является увеличение расхода силы тяги локомотива.

На данный момент времени для минимизации влияния трения разработаны некоторые технические усовершенствования: антифрикционные вкладыши в пятниковых узлах, применение различных смазок в узлах сухого трения, гребне- и рельсосмазыватели и др.

На сегодняшний день требования к подвижному составу сводятся к внедрению высокотехнологичных конструктивных элементов, которые позволят улучшить работу узлов подвижного состава. Нетяговый вид подвижного состава должен удовлетворять многочисленным требованиям и нормам. В большей степени внимание уделяется повышению грузоподъемности и увеличению скорости движения. Для выполнения указанных требований необходимо внедрение новых технических решений, основными из которых можно назвать применение элементов литых деталей.

Улучшение работы узлов трения имеет экономический эффект, так как в условиях рыночной экономики и растущей конкуренции

существенно повышается актуальность снижения стоимости жизненного цикла железнодорожной техники в целом и вагонов в частности. Стоимость жизненного цикла вагона формируется в основном из расходов на содержание в работоспособном состоянии его деталей и узлов. При этом особенно затратными являются ремонт и восстановление элементов литых деталей вагона [4].

Рассмотрим указанную проблему на примере работы пятникового узла. Этот узел – один из самых важных в конструкции вагона, так как он обеспечивает надежность и безопасность движения.

Конструкция пятникового узла и анализ возникающих сил, появляющихся во время эксплуатации

Основными тележками, которые используются в грузовом подвижном составе железных дорог России, являются тележки следующих моделей: 18-100, 18-100М, 18-194-1, 18-9855, 18-578, 18-9810 (рис. 1).



Рис. 1. Тележка модели 18-100М
Fig. 1. Bogie model 18-100M

Перечисленные конструкции тележек являются трехкомпонентными, т.е. в основе конструкции три компонента: две колесные пары, две боковые рамы и надрессорный брус. Все указанные тележки в своей конструкции имеют следующие элементы: две колесные пары, четыре буксы, две литые боковые рамы, литой надрессорный брус, два комплекта рессорного подвешивания и тормозная рычажная передача [5].

При применении тележек подобных конструкций нагрузка от кузова грузового вагона передается через пятниковый узел. Схема опирания кузова вагона показана на рис. 2.

Самым ответственным и наиболее нагруженным местом во многих конструкциях вагонов является узел контакта пятника и подпятника. Этот узел обеспечивает связь кузова и тележки, а

также осуществляет передачу усилий между ними. Пятник, подпятник и шкворень – составляющие элементы данного узла [6].

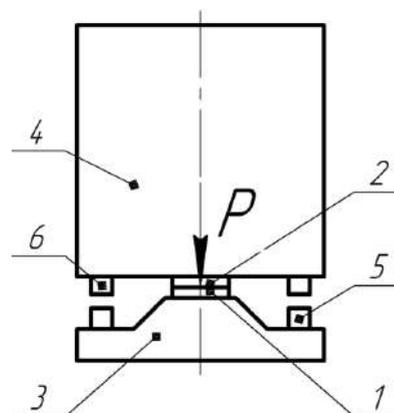


Рис. 2. Опирание кузова грузового вагона через пятник:

1 – подпятник; 2 – пятник; 3 – надрессорный брус;
4 – кузов вагона; 5 – скользян надрессорной балки;
6 – скользян кузова вагона

Fig. 2. Supporting the body of a freight wagon through the center plate:

1 – thrust bearing; 2 – center plate; 3 – bolster;
4 – wagon body; 5 – slider of the bolster;
6 – wagon body side bearing

Опираение кузова тележки происходит через пятник и подпятник, который составляет единое целое с надрессорной балкой. Скользяны дополнительно задействуются при отклонениях кузова. Пятник и подпятник обладают отверстиями, в которые вставляется шкворень. Шкворень грузовой тележки представляет собой литой металлический цилиндр, который выполняет роль оси вращения тележки относительно кузова, а также функцию передачи тяговых и тормозных усилий от тележки к кузову вагона и наоборот.

На рис. 3–5 показаны пятник, подпятник и шкворень литой конструкции, применяемый в тележках грузовых вагонов.

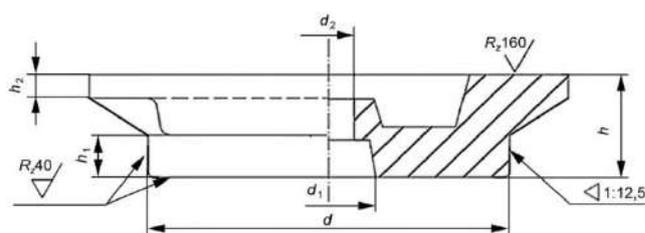


Рис. 3. Конструкция пятника по ГОСТ 34468-2018

Fig. 3. Center plate design according to state standard 34468-2018

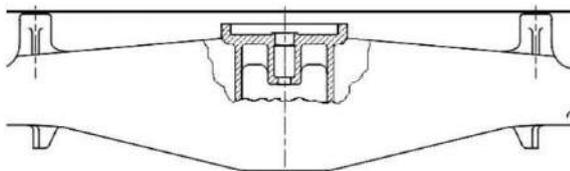


Рис. 4. Конструкция подпятника наддресорной балки тележки модели 18-100

Fig. 4. The design of the thrust bearing of the bogie model 18-100



Рис. 5. Шкворень литой конструкции
Fig. 5. Cast construction kingpin

Согласно [7], пятники выполняются из сталей таких марок, как 30ХГСА, 38 ХС, 40Х, ст45, 09Г2, 20ФЛ, 20Г1ФЛ и т.д. и изготавливаются методом отливки или штамповки. Данные детали состоят из массивной плиты (фланца) с привалочной поверхностью, которая служит местом крепления пятника к раме вагона или соединительной балке четырехосной грузовой тележки, и цилиндра (яблока), который располагается на плите. На цилиндре находятся опорная и упорная поверхности. Опорная поверхность предназначена для передачи вертикальных усилий на тележку и кузов вагона, упорная поверхность – для передачи горизонтальных усилий. Вертикальные нагрузки передаются в месте непосредственного контакта опорной поверхности пятника и рабочей поверхности подпятника. Горизонтальные нагрузки передаются в месте контакта цилиндрической поверхности яблока пятника с внутренней стороной бурта подпятника.

Схема передачи усилий в подпятнике наддресорной балки показана на рис. 6.

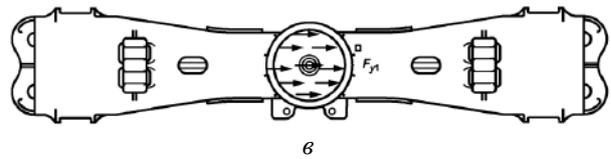
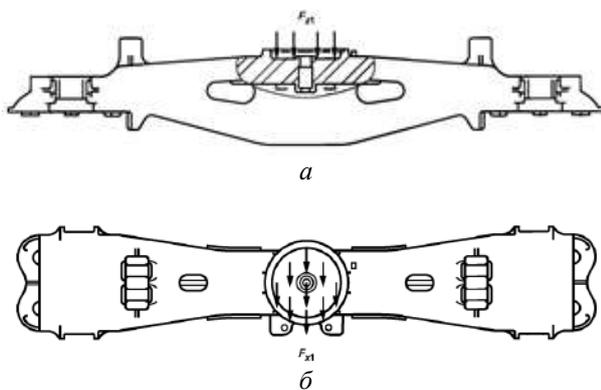


Рис. 6. Схема передачи усилий в подпятнике наддресорной балки:

a – на опорную поверхность; *б* – на упорную поверхность вдоль вагона; *в* – на упорную поверхность поперек вагона

Fig. 6. Scheme of transmission of forces in the thrust bearing bolster:

a – on the supporting surface; *b* – on the thrust surface along the wagon; *c* – on the thrust surface across the wagon

В зависимости от типов и моделей вагонов, конструкции пятниковых узлов различаются между собой прежде всего размерами, а также технико-экономическими параметрами. Например, диаметр цилиндра пятника может колебаться от 280 до 450 мм. Так, кузов восьмисосного вагона опирается на подпятник соединительной балки пятником диаметром 400 мм, а соединительная балка, в свою очередь, опирается на двухосные тележки двумя пятниками диаметром 300 мм. Пятник диаметром 300 мм используется в конструкциях четырехосных вагонов.

Поверхности пятника и подпятника, взаимодействующие в ходе эксплуатации имеют форму, приближающуюся к сферической, что обеспечивает оптимальный контакт. Контактные напряжения при сферической площади соприкосновения по сравнению с плоской, снижаются.

В некоторых работах [8] указывается, что выбор формы пятника зависит от того, каким образом воздействуют скручивающие моменты относительно продольной оси кузова вагона, а также от типа конструкции кузова вагона. Так, цилиндрическая форма пятника с плоской опорной поверхностью наиболее оптимальна для кузовов коробчатого типа. Данные кузова получили распространение среди конструкций полувагонов. Этот тип кузовов не подвергается воздействию скручивающих моментов по продольной оси, тем самым в процессе передачи усилий задействуется вся опорная поверхность и в ходе движения вагона минимизируются поперечные колебания его кузова.

Анализ существующего пятникового узла на предмет надежности и износостойкости

Используемый в настоящий момент пятниковый узел широко используется под многими видами и типами грузового подвижного состава. Он прост в изготовлении, а также в отличие от аналогичных конструкций является ремонтпригодным и технологичным. Материалом для изготовления пятникового узла выступают низколегированные стали. Они достаточно дешевые и обладают хорошими эксплуатационными и технологическими свойствами. Есть и другие преимущества существующего пятникового узла:

1. Нет необходимости в крепежных деталях для фиксации подпятника с надрессорной балкой. Надрессорный брус и подпятник отличаются как единое целое.

2. Простота обработки рабочих поверхностей пятникового узла.

3. Изношенные поверхности можно восстановить путем наплавки в местах износа.

Однако существуют также определенные недостатки. Так, если осуществлялись повторные восстановительные работы с помощью наплавки и при проведении этих работ были допущены нарушения технологии сварки, то возможно появление многих дефектов, например, трещин, образующихся в результате искусственного старения стали (влияние остаточных напряжений и повышенных температур). Основной причиной таких явлений является нагрев при проведении сварочных работ.

Перевалка кузова на пятнике при небольшом пробеге вагона, а также выдавливание смазки из-под опорной поверхности пятника также приводят к появлению дефектов. При выдавливании смазки взаимодействие контактных поверхностей приобретает характер сухого трения. В пятниковом узле возможен износ абразивного типа, так как данный узел является конструкцией открытого типа [9–11].

Приведенные факторы являются причиной интенсивного неравномерного износа опорных и упорных поверхностей пятника и подпятника. На рис. 7 изображены наиболее часто встречающиеся дефекты подпятника.

Также одной из основных причин отклонений в работе пятникового узла от нормальной эксплуатации являются повышенный износ контактных поверхностей (рис. 8) ослабление и обрыв крепления пятника (рис. 9).

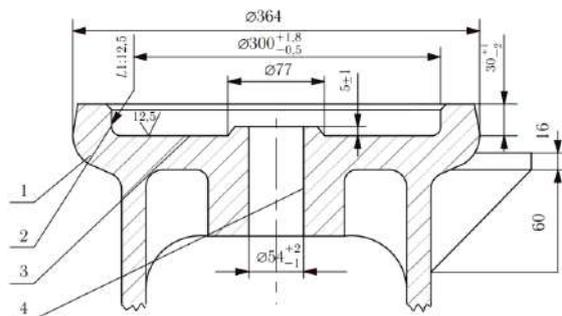


Рис. 7. Основные дефекты подпятника:

- 1 – трещины; 2 – износ упорной поверхности;
3 – износ опорной поверхности;
4 – износ отверстия под шкворень

Fig. 7. The main defects of the thrust bearing:
1 – cracks; 2 – wear of the thrust surface; 3 – wear of the support surface; 4 – wear of the hole under the kingpin



Рис. 8. Пятник с изношенными контактными поверхностями

Fig. 8. Center plate with worn out contacts surfaces



Рис. 9. Обрыв крепежного болта пятника

Fig. 9. Breakage of the center plate fixing bolt

Рабочие поверхности пятниковых узлов во время эксплуатации испытывают значительные статические, динамические нагрузки при силовом взаимодействии поверхности рельса с поверхностью катания колесной пары и гребнями колес подвижного состава, подвергаются

образованию абразива и коррозии на поверхностях контакта. Данные факторы приводят к интенсивному износу поверхностей контакта пятника с подпятником.

Сравнение пятниковых узлов иных конструкций

На сегодняшний день существуют различные конструкции пятниковых узлов грузовых вагонов, но по тем или иным причинам они не получили широкого распространения.

Изучая различные предложенные конструкции пятников и пятниковых узлов, можно выделить следующие направления решения проблемы минимизации различных дефектов, в том числе и износа:

- применение износостойких накладок, посаженных на пятник;
- применение износостойких вкладышей, выполненных в виде пластины или чаши;
- изменение формы пятникового узла, которое позволит уменьшить износ опорной поверхности пятника и подпятника;
- разработка новых пятниковых узлов;
- разработка и применение новых способов нанесения антифрикционных покрытий на контактные поверхности пятниковых узлов.

Самым распространенным решением проблемы уменьшения износа в пятниковом узле является применение в тележках моделей 18-100М, 18-578, 18-194, 18-9810, 18-9855 и т.д. износостойких металлических чаш или дисков, которые устанавливаются в подпятники. Применение данного конструктивного решения позволяет снизить износ лишь подпятника или опорной поверхности подпятника (в случае применения износостойкого диска). При этом происходит износ опорной поверхности пятника и износостойкого вкладыша. На рис. 10 показан поврежденный в ходе эксплуатации износостойкий диск.



Рис. 10. Изношенный диск
Fig. 10. Worn out disk

Рассмотрим иные решения указанной проблемы.

Для решения задачи по минимизации износа пятников грузовых вагонов в ООО «Коруд» была разработана конструкция пятника (рис. 11), суть которой заключается в использовании износостойкой чашевидной накладки, которая напрессовывается в горячем состоянии с радиальным натягом на предварительно обточенные упорную и опорную поверхности пятника. Упорная поверхность износостойкой накладки выполняется конической [12].

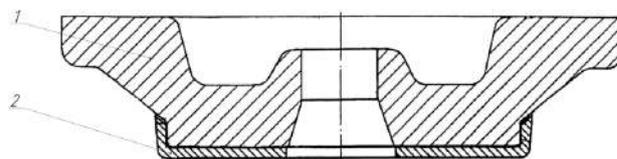


Рис. 11. Пятник конструкции ООО «Коруд»: 1 – пятник; 2 – износостойкая накладка
Fig. 11. Center plate designed by LLC «Korud»: 1 – centre plate; 2 – wear-resistant lining

Применение пятников такой конструкции позволяет снизить трудоемкость ремонта пятникового узла, но реализация данной технологии на линейных предприятиях вагонного хозяйства будет затруднена возможной проблемой отсутствия необходимой технической оснастки.

В ОАО «ВНИКТИ» был разработан пятниковый узел, конструкция которого принципиально не отличается от стандартного пятникового узла. Цель разработчиков заключалась в повышении износостойкости опорной и упорной поверхностей пятника, а также увеличении срока службы пятникового узла [13].

Предложенный пятниковый узел (рис. 12) состоит из пятника, установленного на кузове вагона и подпятника стандартной конструкции, выполненной в виде чашевидного углубления в наддрессорной балке.

Между пятником и подпятником устанавливается износостойкий перфорированный диск. Материал, из которого изготовлен диск, более твердый, чем материал пятника и подпятника. Для уменьшения коэффициента трения диск покрывается с обеих сторон смазочным материалом. Смазочный материал может использоваться как сыпучий, так и пластичный. С аналогичной целью устанавливается износостойкое кольцо между упорной поверхностью

пятника и боковой стенкой подпятника. Для предотвращения выдавливания смазочного материала из-под пятника на внутренний бурт подпятника при помощи болтового соединения устанавливается кольцо из упругого материала. Аналогичную функцию выполняет выемка на износостойком кольце.

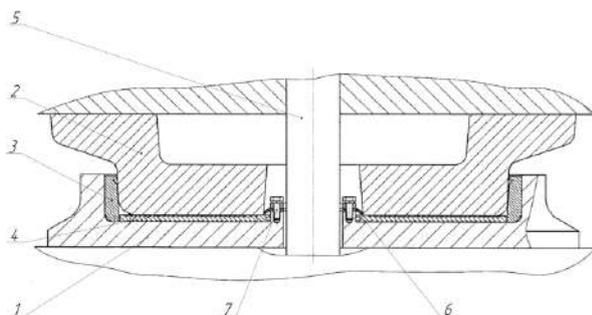


Рис. 12. Пятниковый узел конструкции ОАО «ВНИКТИ»:

1 – подпятник; 2 – пятник; 3 – износостойкое кольцо; 4 – износостойкий перфорированный диск; 5 – шкворень; 6 – кольцо из упругого материала; 7 – болтовое соединение

Fig. 12. Center plate node designed by OJSC «VNIKTI»:

1 – thrust bearing; 2 – center plate; 3 – wear-resistant ring; 4 – wear-resistant perforated disk; 5 – kingpin; 6 – ring made of elastic material; 7 – bolted connection

Возможными недостатками данного пятникового узла могут быть высокая трудоемкость при изготовлении и трудности при проведении ремонта.

Важным направлением решения проблемы износа упорной и опорной поверхностей пятника является изменение его геометрической формы. Например, при движении вагона в кривых возникает явление перевалки кузова относительно центральной оси вагона. В такой ситуации на ребро пятника воздействуют большие контактные напряжения, тем самым усиливается износ пятника.

Одним из решений данной проблемы является выполнение скосов на опорной поверхности пятника. Так, в рамках такой концепции в ООО «ВНИЦТТ» был разработан новый пятник (рис. 13). Этот пятник практически ничем не отличается от стандартного. Основное изменение заключается в том, что на опорной поверхности пятника выполняются скосы (на противоположных сторонах и симметрично продольной оси симметрии пятника) [14].

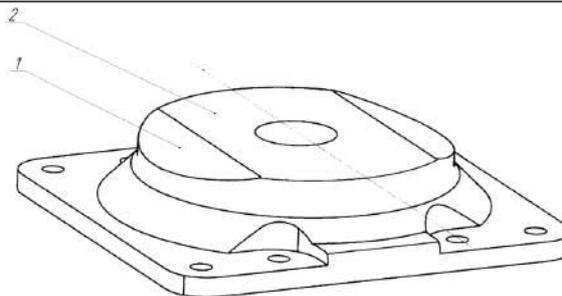


Рис. 13. Пятник конструкции ООО «ВНИЦТТ»: 1 – поверхность скоса; 2 – опорная поверхность
Fig. 13. Center plate of LLC «VNICTT» design: 1 – bevel surface; 2 – supporting surface

Данное усовершенствование позволяет уменьшить величину износа пятника, так как благодаря изменению точки контакта снижаются напряжения и сила трения при вписывании в кривую.

Одним из направлений решения проблемы износа в существующем пятниковом узле является разработка новых конструкций пятниковых узлов.

Так, в Московском институте инженеров транспорта для реализации цели повышения надежности пятниковых узлов была разработана оригинальная конструкция пятникового узла (рис. 14) [15].

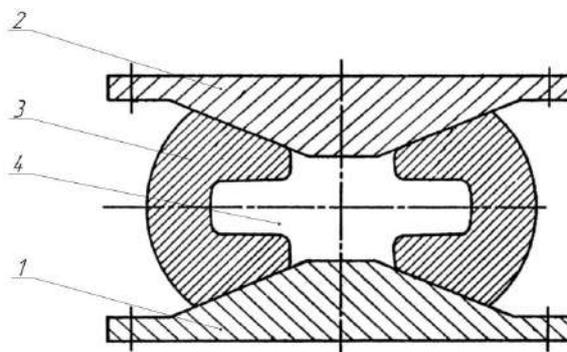


Рис. 14. Пятниковый узел конструкции Московского института инженеров транспорта: 1 – подпятник; 2 – пятник; 3 – шкворень; 4 – полость, заполняемая смазкой

Fig. 14. Center plate node designed by Moscow Institute of Transport Engineers:

1 – thrust bearing; 2 – center plate; 3 – kingpin; 4 – cavity filled with grease

Предложенный пятниковый узел состоит из пятника и подпятника с коническими выступами. Благодаря этому данная конструкция пятникового узла способна воспринимать как вертикальные, так и горизонтальные усилия.

Между ними установлен кольцеобразный шкворень с С-образным сечением. Он выполнен из упругого материала. Полость, которая располагается внутри шкворня, заполняется графитовой смазкой. Данные конструкции имеют ряд недостатков:

1. Ограниченное количество типов и моделей вагонов, на которых применима данная конструкция.

2. Уменьшение площади контакта пятника и подпятника приводит к увеличению напряжения и увеличивает риски развития трещин в надрессорном брусе.

3. Скосы на опорной поверхности снижают надежность узла при воздействии на подвижной состав продольно-поперечных нагрузок в процессе эксплуатации.

4. Усложняется ремонт и обслуживание данного узла.

По мнению некоторых авторов, наиболее оптимальной формой опорной поверхности является форма, стремящаяся к сферической, так как в процессе эксплуатации опорные поверхности пятникового узла приобретают подобную форму.

В данном направлении существуют некоторые разработки. Например, в ОАО «Ижорские заводы» был разработан пятниковый узел со сферическими опорными поверхностями (рис. 15) [16].

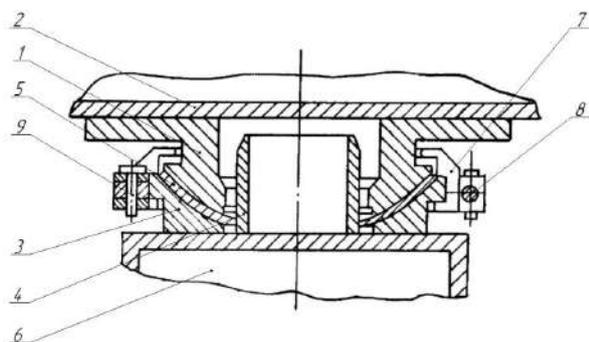


Рис. 15. Пятниковый узел конструкции ОАО «Ижорские заводы»:

1 – пятник; 2 – кузов вагона; 3 – подпятник; 4 – шкворень; 5 – износостойкая прокладка; 6 – рама тележки; 7 – полукольцо; 8 – откидной болт; 9 – ось (болт)

Fig. 15. Center plate node designed by JSC «Izhorskie Zavody»:

1 – center plate; 2 – wagon body; 3 – thrust bearing; 4 – kingpin; 5 – wear-resistant gasket; 6 – bogie frame; 7 – half ring; 8 – folding bolt; 9 – axis (bolt)

Предложенный пятниковый узел состоит из пятника и подпятника со сферическими опорными поверхностями. Между опорными поверхностями пятника и подпятника находится износостойкая прокладка, предотвращающая износ опорных поверхностей. Труба, установленная неподвижно в центре пятникового узла, выполняет роль шкворня и является центрирующим приспособлением при выполнении операции подкатки тележки под кузов вагона. Неразъемность данного пятникового узла обеспечивается применением полуколец с внутренними канавками, которые сжимаются откидным болтом и осью (болтом).

Возможным недостатком предложенной конструкции может быть высокая трудоемкость изготовления.

Подобную конструкцию пятникового узла со сферической опорной поверхностью предложили в ОАО «ВНИКТИ» (рис. 16) [17].

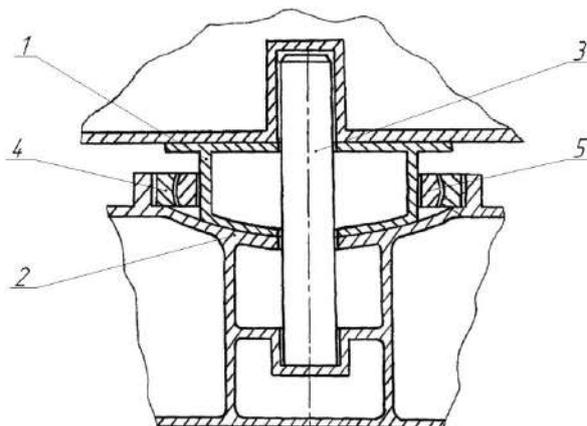


Рис. 16. Пятниковый узел конструкции ОАО «ВНИКТИ»:

1 – пятник; 2 – подпятник; 3 – шкворень; 4 – наружное кольцо; 5 – внутреннее пружинящее кольцо

Fig. 16. Center plate node designed by OJSC «VNIKTИ»:

1 – center plate; 2 – thrust bearing; 3 – kingpin; 4 – outer ring; 5 – inner spring ring

Данный пятниковый узел состоит из пятника и подпятника со сферическими опорными поверхностями, а также шкворня, который устанавливается в отверстиях пятника и подпятника. Конструктивной особенностью предлагаемого пятникового узла является наличие составного кольца, установленного в подпятник. Это кольцо состоит из двух элементов: наружного и внутреннего пружинящего кольца.

Наружное кольцо обладает вогнутой внутренней поверхностью, а внутреннее кольцо имеет выпуклую внешнюю поверхность. В сборе между вогнутой и выпуклой поверхностями колец имеется зазор. Предлагаемая конструкция не имеет износостойких элементов, поэтому весьма подвержена износу.

Одним из способов повышения надежности и долговечности пятниковых узлов является нанесение антифрикционных покрытий на упорные и опорные поверхности пятника и подпятника.

Активно развивается направление, связанное с разработкой новых способов нанесения антифрикционных покрытий. В Центральном управлении интеллектуальной собственностью ОАО «РЖД» был разработан способ нанесения антифрикционных покрытий на упорные поверхности пятникового узла. Данный способ направлен на обеспечение повышения прочности и срока службы антифрикционного слоя, удаление неровностей металлического слоя и понижение коэффициента трения [18].

Поставленные цели достигаются тем, что предварительно наносится на опорные поверхности пятникового узла шероховатый слой толщиной от 0,01 до 3,0 мм электроискровым методом с использованием электродов из средне- или высокоуглеродных сталей и последующее нанесение антифрикционного слоя, отличающийся тем, что на подготовленный шероховатый слой подогреваемым двухсopловым краскораспылителем наносят эпоксидный композит, состоящий из двух равных по массе и объему частей, подаваемых из разных сопел.

Возможными недостатками данного способа может быть сложность массовой реализации подобной технологии на вагоноремонтных предприятиях и достаточно долгое время отвержения покрытия.

В АО «Алтайвагон» был разработан пятник грузового вагона, опорная поверхность которого модернизирована для решения проблемы пополнения смазки в узле «пятник – подпятник» (рис. 17).

С помощью данного усовершенствования пятника разработчики попытались добиться увеличения долговечности пятника за счет уменьшения износа его опорной поверхности путем обеспечения постоянного нахождения достаточного количества смазки в зоне контакта пятника и подпятника в выемках и отсут-

ствия возможности попадания грязи между трущимися поверхностями.

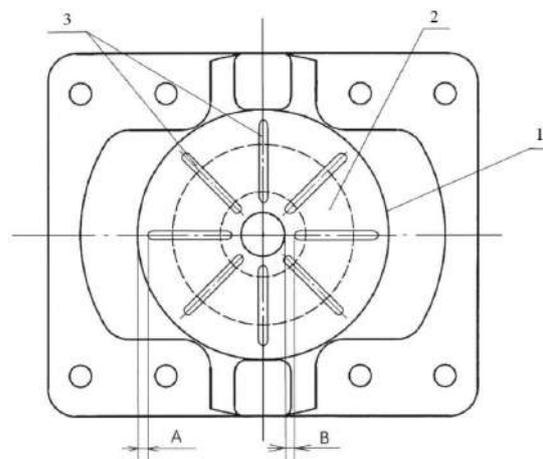


Рис. 17. Схема пятникового узла конструкции АО «Алтайвагон»:

1 – упорная поверхность; 2 – опорная поверхность;
3 – выемка; 4 – подпятник

Fig. 17. Scheme of the center plate node designed by JSC «Altaivagon»:

1 – thrust surface; 2 – supporting surface; 3 – notch;
4 – thrust bearing

В данной модели пятника на опорной поверхности были выполнены выемки одинаковой или разной длины, а их глубина составляет не более 6,5 мм. Выемки заполняются смазочным материалом. Указанная глубина позволяет создать запас смазочного материала в углублениях на весь период эксплуатации пятника, истирание опорной части которого, согласно нормативной документации, не может превышать 6 мм.

Явных недостатков у предложенной конструкции не выявлено.

Известны иностранные конструктивные решения, применяемые в узле «пятник – подпятник». Так, в ряде стран Западной Европы применяются пятниковые узлы, имеющие контактную поверхность сферической формы.

В США в конструкции пятниковых узлов использовались шариковые или роликовые подшипники [19]. В дальнейшем в конструкции американских вагонов стал использоваться пятниковый узел со сферической контактной поверхностью.

Заключение

Подводя итог, можно сделать вывод, что на данный момент активно идет поиск решения

проблемы износа пятникового узла. Предлагаются новые конструкции пятников, пятниковых узлов, а также разрабатываются методы нанесения антифрикционных покрытий на опорные и упорные поверхности пятника и подпятника. Однако предложенные конструкции пятников и пятниковых узлов не имеют широкого распространения. Поэтому наиболее эффективным и дешевым решением обозначенной проблемы

является подбор износостойких материалов для изготовления специальных чаш или дисков. Применение данного решения позволит продлить срок эксплуатации стандартных пятниковых узлов, а также минимизирует момент сил трения, который препятствует угловым перемещениям тележки в ходе движения в кривых участках пути.

Список литературы

1. Трибологические исследования для разработки модификаторов трения в системе «колесо-рельс» / С.М. Захаров, И.Г. Горячева, А.П. Краснов и др. // Трение и износ. 2015. Т. 36. № 6. С. 611–620.
2. Воронин Н.Н., Воронин Н.Н. Мл., Зин Э.М. Износы в пятниковых узлах цистерн // Мир транспорта. 2013. Т. 11. № 1 (45). С. 30–35.
3. Филиппов В.Н., Тармаев А.А., Жайсан И. Снижение износа гребней колес грузовых вагонов за счет рационализации параметров узлов опирания кузова // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2018. № 4 (40). С. 11–17.
4. Оценка напряженно-деформированного состояния кожухов тяговых редукторов электровозов / А.В. Слепцов, Е.Ю. Дульский, Е.А. Милованова и др. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы девятой междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. Т. 2. С. 654–660.
5. ГОСТ 9246-2013. Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. Введ. 2014–07–01. М. : Стандартинформ, 2014. 36 с.
6. Оценка работы сил трения в боковом контакте «колесо – рельс» и на сопрягаемых поверхностях пятникового узла грузовых вагонов методами компьютерного моделирования / В.И. Колесников, А.П. Сычѳв, А.А. Зарифьян и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2015. № 1 (57). С. 13–21.
7. ГОСТ 34468–2018 Пятники грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. Введ. 2019–07–01. М. : Стандартинформ, 2018. 35 с.
8. Kereszty P. Role of the center plate and side bearing in the safe riding of rail vehicles // Acta techn. Acad. sci. hung. 1974. № 1-2, P. 129–152.
9. Васильев С.М., Пищик А.В. Особенности работы узла «пятник – подпятник» в вагонах-платформах для перевозки крупнотоннажных контейнеров // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI междунар. науч.-практ. конф. Гомель, 2021. Ч. 1. С. 93–94.
10. Вериго М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колес. М. : ПТКБ ЦП МПС, 1997. 207 с.
11. Заверталоу А.В. Влияние технического состояния узлов опирания грузовых вагонов на сопротивление повороту тележек // Вестн. Всерос. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2000. № 3. С. 9–12.
12. Пат. 49782 Рос. Федерация. Пятник грузового вагона / С.И. Попов, В.М. Круглов, А.В. Осинцев и др. № 2005116540/22 ; заявл. 30.05.2005 ; опубл. 10.12.2005, Бюл. № 34. 1 с.
13. Пат. 2465161 Рос. Федерация. Пятниковый узел опоры кузова на тележку грузового вагона / В.А. Чаркин, В.В. Березин, Ю.А. Панин и др. № 2011123682/11 ; заявл. 14.06.2011 ; опубл. 27.10.2012, Бюл. № 30. 7 с.
14. Пат. 2613113 Рос. Федерация. Пятник железнодорожного подвижного состава / Р.А. Савушкин, К.В. Кякк, А.С. Кононенко и др. № 2015156658 ; заявл. 29.12.2015 ; опубл. 15.03.2017, Бюл. № 8. 7 с.
15. А.с. 1595724 СССР. Пятниковый узел рельсового транспортного средства / В.А. Юдин, М.М. Болотин, П.А. Устич и др. № 4615849 ; заявл. 05.12.1988 ; опубл. 30.09.1990, Бюл. № 36. 2 с.
16. Пат. 2228276 Рос. Федерация. Пятниковый узел рельсового транспортного средства / В.А. Трунов. № 2001133492/11 ; заявл. 07.12.2001 ; опубл. 10.05.2004, Бюл. № 13. 4 с.
17. Пат. 2279368 Рос. Федерация. Пятниковый узел опоры кузова на тележку грузового вагона / А.И. Кокорев, В.В. Березин, А.А. Лунин. № 2004138580/11 ; заявл. 29.12.2004 ; опубл. 10.07.2006, Бюл. № 19. 7 с.
18. Пат. 2574548 Рос. Федерация. Способ нанесения антифрикционных покрытий на упорные поверхности пятникового узла / В.И. Колесников, А.П. Сычев, А.В. Лапицкий и др. № 2014146880/02 ; заявл. 21.11.2014 ; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4. 5 с.
19. Американские железнодорожные энциклопедии: вагоны / под ред. П.И. Травина. М. : Трансжелдориздат, 1937. 844 с.

References

1. Zakharov S.M., Goryacheva I.G., Krasnov A.P., Yudin A.S., Morozov A.V., Markov D.P., Naumkin A.V., Ovechkin A.V. Tribologicheskie issledovaniya dlya razrabotki modifikatorov treniya v sisteme «koleso-rel's» [Tribological researches for the development of friction modifiers in the wheel-rail system]. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 2015, vol. 36, no. 6, pp. 611–620.
2. Voronin N.N., Voronin N.N. Jr., Zin E.M. Iznosy v pyatnikovyx uzлах tsistern [Tear and wear of center plate units of rail tanks]. *Mir transporta* [The world of transport], 2013, vol. 11, no. 1 (45), pp. 30–35.
3. Filippov V.N., Tarmaev A.A., Zhaisan I. Snizhenie iznosa grebnei koles gruzovykh vagonov za schet ratsionalizatsii par-

ametov uzlov opiraniya kuzova [Reducing the wear of the ridges of the wheels of freight wagons by rationalizing the parameters of the body support units]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2018, no. 4 (40), pp. 11–17.

4. Sleptsov A.V., Dul'skii E.Yu., Milovanova E.A., Pykhalov A.A. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kozhukhov tyagovykh reduktorov elektrovozov [Assessment of the stress-strain state of electric locomotive traction gear housings]. *Materialy Devyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the 9th International Scientific-Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, vol. 2, pp. 654–660.

5. GOST 9246-2013. Telezhki dvukhosnye trekhelementnye gruzovykh vagonov zheleznykh dorog kolei 1520 mm Obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard 9246-2013. Bogies two-axle three-piece for freight wagons of 1520 mm gauge railways. General technical specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 36 p.

6. Kolesnikov V.I., Sychev A.P., ZariF'yan A.A., Kolesnikov I.V., Sychev A.A. Otsenka raboty sil treniya v bokovom kontakte «koleso – rel's» i na sopryagaemykh poverkhnostyakh pyatnikovogo uzla gruzovykh vagonov metodami komp'yuternogo modelirovaniya [Evaluation of the work of friction forces in the lateral contact «wheel – rail» and on the mating surfaces of the pyatnik node of cargo wagons by computer modeling methods]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2015, no. 1 (57), pp. 13–21.

7. GOST 34468-2018. Pyatniki gruzovykh vagonov zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard 34468-2018. Center plates of the freight wagons for 1520 mm gauge railways. General specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2018. 35 p.

8. Kereszty P. Role of the center plate and side bearing in the safe riding of rail vehicles. «Acta techn. Acad. sci. hung», 1974, no. 1–2, pp. 129–152.

9. Vasil'ev S.M., Pishik A.V. Osobennosti raboty uzla «pyatnik – podpyatnik» v vagonakh-platformakh dlya perevozki krupnotonnazhnykh konteynerov [Features of the operation of the center plate –thrust bearing node in platform wagons for the transportation of large-capacity containers]. *Materialy XI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy bezopasnosti na transporte» (v 2 ch.)* [Proceedings of the XI International Scientific and practical conference «Problems of transport safety» (in 2 parts)]. Gomel, 2021, part 1, pp. 93–94.

10. Verigo M.F. Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava v krivykh malogo radiusa i bor'ba s bokovym iznosom rel'sov i grebnei koles [The interaction of track and rolling stock in small radius curves and the fight against lateral wear of rails and wheel ridges]. Moscow: PTKB TsP MPS Publ., 1997. 207 p.

11. Zavertalyuk A.V. Vliyaniye tekhnicheskogo sostoyaniya uzlov opiraniya gruzovykh vagonov na soprotivleniye povorotu telezhek [The influence of the technical condition of the support units of freight wagons on the resistance to turning bogies]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the All-Russian Scientific-Research Institute of Railway transport], 2000, no. 3, pp. 9–12.

12. Popov S.I., Kruglov V.M., Osintsev A.V., Chizhov V.A. Patent RU 49782 U1, 10.12.2005.

13. Charkin V.A., Berezin V.V., Panin Yu.A., Trifonov A.V. Patent RU 2465161 C1, 27.10.2012.

14. Savushkin R.A., Kyakk K.V., Kononenko A.S., Shevchenko D.V., Savel'ev S.A. Patent RU 2613113 C1, 15.03.2017.

15. Yudin V.A., Bolotin M.M., Ustich P.A., Moksyakov A.P., Vanslov Yu.D. Copyright certificate SU 1595724 A1, 30.09.1990.

16. Trunov V.A. Patent RU 2228276 C2, 10.05.2004.

17. Kokorev A.I., Berezin V.V., Lunin A.A. Patent RU 2279368 C1, 10.07.2006.

18. Kolesnikov V.I., Sychev A.P., Lapitskii A.V., Bardushkin V.V. Patent RU 2574548 C1, 10.02.2016.

19. Amerikanskie zheleznodorozhnye entsiklopedii: vagony [American Railway Encyclopedias: wagons]. Ed. Travin P.I. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1937. 844 p.

Информация об авторах

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

Иванов Павел Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

Ромашов Антон Викторович, аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: Patifonik@bk.ru.

Трескин Сергей Викторович, кафедра вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: sergei.treskin@yandex.ru.

Information about the authors

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

Pavel Yu. Ivanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

Anton V. Romashov, Ph.D. student of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: Patifonik@bk.ru.

Sergei V. Treskin, Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: sergei.treskin@yandex.ru.

Цифровизация как основное стратегическое направление для достижения устойчивой конкурентной позиции ОАО «РЖД» на транспортном рынке

Н.В. Власова, В.А. Оленцевич✉

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

✉olencevich_va@mail.ru

Резюме

В статье рассмотрены вопросы целесообразности применения в производственном процессе структурных подразделений и филиалов Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом ОАО «РЖД» маркетинговой стратегии, основной задачей которой является достижение положительных результатов функционирования в условиях глобального изменения логистических схем доставки грузов на восточном направлении. Представлены результаты социологического исследования удовлетворенности клиентов, проведенного с применением методов системного анализа, позволившего выявить сильные и слабые стороны работы ОАО «РЖД». Выполнена сравнительная оценка лояльности клиентов при использовании транспортно-логистических сервисов и услуг. Это в дальнейшем помогло сформировать комплекс мероприятий, направленных на повышение уровня клиентоориентированности грузовых перевозок ОАО «РЖД». Цифровизацию в данном случае необходимо рассматривать как источник основного конкурентного преимущества компании на рынке транспортно-логистических услуг в долгосрочной перспективе, так как сегодня цифровая трансформация затрагивает все сферы бизнес-процессов. Адресация вагоно- и поездопотоков на экономически более оптимальных объектах транспортной инфраструктуры, концентрация грузовой работы на технически развитых грузовых дворах и комплексах позволяют сократить зависящие затраты структурных подразделений и филиалов ОАО «РЖД», а также снизить себестоимость перевозочного процесса. Научная проработка данного вопроса должна включать в себя маркетинговые исследования лояльности клиентов с использованием систематизированного метода исследования сценариев (SWIFT), что позволит определить сильные и слабые стороны работы компании и заблаговременно внести изменения в стратегию развития с целью достижения устойчивого конкурентного положения на транспортном рынке.

Ключевые слова

железнодорожный транспорт, качество грузовых перевозок, оценка лояльности клиентов, транспортно-логистические услуги, уровень клиентоориентированности, информационные технологии, бизнес-модель, цифровые инновации, трансформация транспортного процесса

Для цитирования

Власова Н.В. Цифровизация как основное стратегическое направление для достижения устойчивой конкурентной позиции ОАО «РЖД» на транспортном рынке / Н.В. Власова, В.А. Оленцевич // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 127–135. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).127-135.

Информация о статье

поступила в редакцию: 23.01.2023; поступила после рецензирования: 28.03.2023 г.; принята к публикации: 29.03.2023 г.

Digitalization as the main strategic direction for achieving a stable competitive position of JSC «Russian Railways» in the transport market

N.V. Vlasova, V.A. Olentsevich✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉olencevich_va@mail.ru

Abstract

The scientific article discusses the feasibility of applying a marketing strategy in the production process of structural divisions and branches of the Central Directorate for the Management of the Terminal and Warehouse Complex of JSC "Russian Railways", whose main task is to achieve positive functioning results under the conditions of global changes in logistics schemes for the delivery of goods in the eastern direction. The results of a sociological study of customer satisfaction are presented, which made it possible to identify the strengths and weaknesses of the work of JSC «Russian Railways» using methods of system analysis. A comparative assessment of customer loyalty when using transport and logistics services was carried out, which made it possible to further propose a set of measures aimed at increasing the level of customer-oriented freight transportation of JSC «Russian Railways». Digitalization in this case should be considered as a source of the main competitive advantage of JSC «Russian Railways» in the market of transport and logistics services in the long term, because today digital transformation affects all areas of business processes. Addressing of car and train traffic at economi-

cally more optimal transport infrastructure facilities, the concentration of freight work on technically developed freight yards and complexes, allows to reduce the dependent costs of structural divisions and branches of JSC «Russian Railways», reduce the cost of the transportation process. The scientific study of this issue should include marketing research of customer loyalty, using a systematic method of scenario research (SWIFT), which will allow to determine the strengths and weaknesses of the company's work and make changes in advance to the development strategy in order to achieve a stable competitive position in the transport market.

Keywords

railway transport, freight transport quality, customer loyalty assessment, transport and logistics services, customer orientation level, information technology, business model, digital innovations, transformation of the transport process

For citation

Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Tsifrovizatsiya kak osnovnoe strategicheskoe napravlenie dlya dostizheniya ustoichivoi konkurentnoi pozitsii OAO «RZhD» na transportnom rynke [Digitalization as the main strategic direction for achieving a stable competitive position of JSC «Russian Railways» in the transport market]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 127–135. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).127-135.

Article Info

Received: January 23, 2023; Revised: March 28, 2023; Accepted: March 29, 2023.

Введение

В настоящее время эффективность функционирования большинства структурных подразделений и филиалов ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») обеспечивается за счет проведения политики долгосрочного прогноза основных показателей, применения перспективного подхода к планированию с целью достижения устойчивого конкурентного положения на транспортном рынке. Согласно маркетинговой стратегии ОАО «РЖД», процесс планирования работы Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом (ЦМ) должен в первую очередь содержать анализ стратегической исходной позиции сектора грузовой и коммерческой работы на транспортном рынке, оценку и выбор жесткой конкурентной позиции, способствующей достижению основных целей и задач отрасли в целом, а также определять основные направления производственно-хозяйственной деятельности и сбыта транспортных сервисов и услуг на перспективу [1–3].

Применение в производственном процессе ЦМ маркетинговой стратегии позволяет достичь ряда положительных результатов:

- структурировать и упорядочить деятельность структурных подразделений и филиалов;
- сфокусировать внимание на перспективных и прибыльных сегментах транспортного рынка;
- систематизировать основные производственные и маркетинговые планы развития компании;
- поддерживать корпоративное поведение руководителей и работников ЦМ, направ-

ленное на повышение уровня конкурентоспособности ОАО «РЖД» и прирост уровня его конкурентных преимуществ в транспортной и логистической деятельности;

– предусматривать эффективное распределение трудовых и финансовых ресурсов.

Реализация поставленных принципов позволяет: понять ценность предоставляемых сервисов и услуг для клиентов в сфере грузовых перевозок; оценить конкурентные преимущества и недостатки в работе структурных подразделений и филиалов ЦМ; сформулировать долгосрочные планы развития в целях укрепления существующих и занятия новых рыночных позиций; обеспечить прирост доли услуг ЦМ на транспортном рынке, увеличить объемы их реализации; выйти на новые рынки сбыта продукции транспортно-грузовых услуг; расширить географические границы продаж [4, 5].

Роль Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом на рынке услуг

Проведенное социологическое исследование удовлетворенности клиентов ЦМ с использованием систематизированного метода исследования сценариев (SWIFT) позволило выявить сильные и слабые стороны работы компании в 2022 г. (табл.).

Из проведенного исследования следует ряд выводов, на основе которых авторами сформулированы следующие предложения:

1. В ближайшие три года необходимо обратить особое внимание на качество предоставления сервисов и услуг.

Результаты SWIFT-анализа
SWIFT-analyses results

Стороны Sides	Показатель Nominator
Сильные Strong	Удобная логистика, инфраструктура Convenient logistics, infrastructure
	Предоставление комплекса услуг Provision of a wide range of services
	Соответствие цены и качества Cost and quality correspondence
	Квалификация персонала Personnel qualification
	Техническая оснащенность Technical equipment
Слабые Weak	Негибкость, неповоротливость Inflexibility
	Нехватка персонала Lack of staff
	Плохая оснащенность, старая техника Poor equipment, old technic
	Задержки, несоблюдение сроков Delays, missed deadlines
	Неудобный график работы Inconvenient work schedule
	Негибкие условия оплаты (работа по предоплате) Inflexible payment terms (prepaid work)
	Отсутствие информированности клиентов об услуге закрепления гру- зов Lack of customer awareness about cargo securing service

2. Провести работу, направленную на повышение коэффициента готовности техники на грузовых дворах, с учетом обновления парка погрузочно-выгрузочной техники и оборудования.

3. Провести восстановление работоспособности тяжелыми видами ремонта и обслуживания.

4. Выработать возможные механизмы обеспечения грузовых дворов дублирующей техникой с целью снижения степени риска по срыву сроков производства работ при поломке основного парка техники.

5. Осуществить нормирование резервного парка техники и определить место его дислокации, заключить договоры на предоставление техники и т.д.

Кроме того, необходимо провести работу по повышению оперативности и гибкости распределения трудовых ресурсов с учетом фактической потребности на существующие объемы работ [6–9].

В рамках проведенного анализа также проводилась сравнительная оценка лояльности клиентов ЦМ ОАО «РЖД», показавшая, что доля клиентов, имеющих отрицательные отзывы («критиков»), составляет 31%; доля клиентов, давших положительные отзывы («сторонников») – 42%; клиентов, занявших нейтральные позиции, – 27%. Таким образом, индекс лояльности клиентов NPS, позволяющий провести сравнительную оценку существующих услуг и сервисов ОАО «РЖД», соотнесенный с индексами разных транспортных компаний, составляет 11, тогда как клиенты прочих транспортных компаний, оказывающих сервисы и услуги, аналогичные услугам ОАО «РЖД», демонстрируют большую лояльность своим партнерам: NPS = 38 («сторонники» – 55%, нейтральные потребители – 28%, «критики» – 17%).



Рис. 1. Сравнительная оценка лояльности клиентов ОАО «РЖД»
Fig. 1. Comparative assessment of customer loyalty of Russian Railways

Сравнительная оценка лояльности клиентов ОАО «РЖД», а также место компании на рынке транспортно-логистических услуг в сфере грузовых перевозок представлены на рис. 1.

При этом общий показатель удовлетворенности работой ЦМ ниже, чем у других транспортных компаний, оказывающих сходные сервисы и услуги. Средний балл составляет 7,45 против 8,6. Данное значение говорит о том, что отрицательная динамика не наблюдается, однако относительно низкий результат показывают следующие характеристики: оперативность, оснащенность техникой, доступность автотранспорта и стоимость услуг.

Респондентам предлагалось ответить на вопрос, насколько они в целом удовлетворены транспортно-логистическими сервисами и услугами, предоставляемыми ОАО «РЖД». При этом оценка производилась по десяти-балльной шкале, где 1 – совсем не удовлетворен, а 10 – удовлетворен полностью. Оценки объединены в группы с интервалом в два балла. ЦМ ОАО «РЖД» оценивали те, кто пользуется их сервисами и услугами, остальные оценивали транспортные компании, у которых они приобретают аналогичные услуги (рис. 2).

В соответствии с долгосрочной стратегией развития ОАО «РЖД» для ЦМ на 2022–2026 гг. предусмотрено решение комплекса задач. Одной из них является обеспечение прироста доходов от подсобно-вспомогательной деятельности на уровне 9 млрд руб., что отражено

в инвестиционном сценарии перспективного плана развития до 2025 г., предусматривающего дополнительные инвестиции в инфраструктурный комплекс грузовых перевозок в объеме 7 млрд руб., в 2023 г. – 9 млрд руб., в 2024 г. – 10 млрд руб. Кроме того, долгосрочным планом развития предусмотрен прирост основных целевых показателей по всем направлениям деятельности ЦМ. При этом плановым коэффициентом лояльности на 2024 г. принимается NPS = 62 [1, 2, 7]. Долю логистических и терминально-складских услуг, предоставляемых ЦМ пользователям, предполагается увеличить с 3,7 % в 2020 г. до 6 % в 2024 г.

Согласно долгосрочной стратегии развития ЦМ, количество грузовых дворов, оказывающих транспортно-логистические сервисы и услуги высокого качества, предусмотрено нарастить к 2024 г. на 30 %.

Для реализации Стратегии развития ОАО «РЖД» необходимо сформировать комплекс функциональных целей по следующим направлениям деятельности ЦМ: производственная деятельность; организационная структура и персонал; маркетинг и продажи; финансы и экономика; цифровизация; перспективы развития.

Функциональные цели необходимо деконструировать на задачи, согласно методологии математического моделирования, замечательно, если ключевых задач будет до десяти, что позволит сформировать эффективную стратегическую карту перспективного развития ЦМ. Для



Рис. 2. Сравнительная оценка удовлетворенности клиентов услугами ОАО «РЖД»
Fig. 2. Comparative assessment of customer satisfaction with the services of Russian Railways

каждого элемента стратегической карты необходимо выбрать показатели, которые можно будет отобразить в числовом эквиваленте. Далее необходимо установить целевые значения для каждого показателя с разбивкой по временным промежуткам – кварталам [7, 10–13].

При выборе целевых значений нужно придерживаться следующих правил:

- цели и задачи не должны конфликтовать и противоречить друг другу;
- цели должны быть достижимыми и однозначными;
- достижение целей должно требовать напряжения.

Также важно учитывать существование легкодостижимых или невыполнимых целей и задач, которые не мотивируют сотрудников на работу, а значит, не обеспечивают реализацию основных стратегических направлений развития ЦМ.

Далее необходимо обеспечить разработку комплекса стратегических мероприятий и тактическое планирование. Для достижения функциональных целей структурные подразделения и филиалы ЦМ, ответственные за реализацию стратегии по направлениям, указанным ранее, необходимо предусмотреть разработку плановых мероприятий, дорожных карт и других нормативных документов, ориентация на которые позволит достичь заданных функциональных параметров и стратегической цели.

Предложения по улучшению качества предоставляемых услуг Центральной дирекцией по управлению терминально-складским комплексом

С целью улучшения качества предоставляемых услуг в целом по ЦМ ОАО «РЖД» в ряде структурных подразделений и филиалах необходимо в период с 2022–2026 гг. предусмотреть ряд мероприятий:

- повышение оперативности предоставляемых транспортно-логистических сервисов и услуг;
- оснащение грузовых дворов современным высокотехнологичным оборудованием и техникой в соответствии с объемами грузопереработки;
- оснащение достаточным количеством квалифицированного персонала, задействованного в работах;

- запуск Единого контакт-центра ЦМ для оперативного решения вопросов клиентов;

- переход к клиентоориентированному подходу на всех уровнях деятельности при условии соблюдения фирменного стиля;

- регулярное проведение маркетинговых исследований и опросов клиентов с целью повышения уровня качества предоставляемых сервисов и услуг;

- совершенствование и оптимизация документооборота с пользователями транспортными услугами на основе принципов цифровизации;

- организация центров коммерческой документации (ЦОКД);

- автоматизация и цифровизация производственных процессов и услуг транспортно-логистического сектора;

- разработка пакетов услуг по видам грузов и их актуализация с учетом современных подходов;

- проведение переговоров с клиентами, заключение договоров;

- своевременное информирование клиентов о новых услугах и сервисах;

- анализ результатов предоставления услуг и работы сервисов, их доработка и адаптация к требованиям пользователей [14–16].

Цифровизация как основное стратегическое направление для достижения устойчивой конкурентной позиции

Внедрение современных цифровых технологий в производственную деятельность ЦМ является одним из ключевых направлений, которое связано со стремительным развитием информационных технологий в России в целом. От того, насколько структурные подразделения и филиалы ОАО «РЖД» готовы применять новый формат функционирования, напрямую зависит результат деятельности компании в целом [17].

Цифровизация ЦМ предполагает реализацию трех основных этапов, последовательное внедрение которых предусматривает повышение уровня клиентоориентированности грузовых перевозок:

1. Цифровая оптимизация. Процесс использования цифровых технологий с целью повышения качества существующих операционных процессов и бизнес-моделей за счет их цифровизации и взаимоувязки. Оптимизация предполагает повышение уровня эффективности

внутренних производственных процессов и взаимосвязей, расширение возможностей оказания транспортно-логистических услуг для сотрудников, сокращение финансовых издержек.

2. Цифровые инновации. Создание уникального цифрового продукта с использованием высокотехнологичных ресурсов и сервисов на основе технологий больших данных, нейротехнологий и искусственного интеллекта, системы распределенного реестра (блокчейн), квантовых технологий, новых производственных технологий.

3. Цифровая трансформация. Процесс создания актуальных продуктов и услуг с абсолютно новым ценностным предложением. Трансформация предполагает исследование пользовательского опыта, сценариев взаимодействия и поиск новых моделей для формирования инновационных транспортно-логистических сервисов и услуг. В отличие от цифровой оптимизации меняется сама модель ведения бизнеса, совершенствуется корпоративная культура, изменяется процедура потребления и восприятия транспортных сервисов и услуг. Цифровая трансформация предполагает преобразование всей структуры ЦМ, поиск новых способов и решений взаимодействия между отделами, службами, формирование единого сквозного информационного потока направленного на создание целостного подхода по повышению уровня транспортного обслуживания конечного потребителя.

Цифровая трансформация нацелена на внешние изменения компании во взаимодействии с клиентами, нахождение точек соприкосновения, их удержание и вовлеченность в процесс, дифференциацию сервисов и услуг, приводящих к лидерству на транспортном рынке.

ЦМ в настоящее время находится на первой ступени цифровизации – цифровая оптимизация. Активно проводится работа по созданию новых информационных систем, цифровизации процессов, которые необходимо завершить до 2024 г. Главной задачей ЦМ является увязка всех производственных процессов и используемых информационных систем [18].

Сегодня значительная часть современных терминально-складских комплексов имеет оснащение системами управления складом (Warehouse Management Systems, WMS), которые для обеспечения эффективной работы получают данные от баркодов и RFID-меток, раз-

мещенных на транспортной таре. Системы контроля склада (Warehouse Control Systems, WCS) являются более продвинутым уровнем, так как на складском оборудовании установлены сенсоры, позволяющие произвести поиск нужной транспортной единицы.

Некоторые складские комплексы оснащены системами автоматизации зданий (Building Automation Systems, BAS), которые с помощью датчиков способны отслеживать и управлять системами освещения, кондиционирования и вентиляции, они обеспечивают функционирование комплекса безопасности и контроля доступа на склад третьим лицам. Интерактивными интерфейсами – дашбордами оснащены современные системы WMS, WCS и BAS, которые позволяют работникам складского сектора беспрепятственно управлять производственным процессом. Технологии Интернета вещей позволяют объединить данные этих систем, обеспечить их кросс-функциональное взаимодействие для решения более сложных задач.

Интернет вещей в логистике может принимать различные формы, объединяя в себе разные технологии, начиная от непосредственно подключаемых устройств (датчиков, сенсоров, меток, роботов) и заканчивая способами обеспечения между ними интерконнекта. Связность устройств и систем обеспечивают беспроводные технологии передачи данных – Bluetooth, RFID, Zigbee и WiFi, а также мобильные 3G- и LTE-сети, объединяющие весь ряд устройств в одно целое. Также IoT-решения позволяют повысить эффективность работы складского оборудования начиная от погрузчиков и заканчивая лентами транспортеров: они могут быть оснащены датчиками, чтобы определить их оптимальную пропускную способность и скоростной режим.

IoT следует рассматривать как инструмент для обеспечения плавного движения операций и сокращения недоиспользования ресурсов для максимизации прибыли. При организации перевозки мелких и малотоннажных партий грузов внедрение в структурных подразделениях и филиалах ЦМ IoT позволит:

- оптимизировать использование инфраструктурного комплекса (склады для кратковременного хранения груза, погрузочно-разгрузочные механизмы и оборудование);
- повысить уровень безопасности и снизить риски (например, хищение груза);

- производить достоверный мониторинг производственных ресурсов и эффективной организации технологических процессов и производства в целом;

- осуществлять визуальный контроль производственной деятельности в реальном режиме времени, незамедлительно реагировать на события;

- анализировать реальные данные с целью оптимизации принятия управленческих решений;

- минимизировать время на обработку данных ручным способом с целью прироста степени их точности и достоверности;

- разработать новые эффективные подходы, на основе изучения алгоритмов поведения пользователей услугами;

- повысить качество обслуживания клиентов.

На основе рассмотренных существующих и перспективных технических и технологических подходов в организации перевозок мелких и малотоннажных отправок грузов следует вывод о достаточно быстром изменении мировых транспортных технологий, что основывается на постоянном пересмотре существующих технологий по составлению и использованию бизнес-процессов, выполняемых в цепочке поставок [19–21].

Существующие подходы к организации транспортно-логистических комплексов предполагают наличие возможностей использования инновационных ресурсов с целью обеспечения сквозного отслеживания, визуализации и обработки грузовых потоков. Глобальное преобразование логистических схем доставки грузов на восточном направлении требует пересмотра имеющихся технологий, используемых в цепочке поставок грузов, их расширения и изменения.

Исходя из изложенного, на 2022–2026 гг. ЦМ ОАО «РЖД» необходимо решить следующие задачи в части развития цифровизации:

- разработка и внедрение «Автоматизированной системы управления терминально-складским комплексом» (АСУ ТСК);

- разработка и размещение на странице ЦМ сайта ОАО «РЖД» калькулятора по расчету стоимости услуг ЦМ;

- установка на складских комплексах ЦМ систем управления складом WMS.

Заключение

В научной статье на основе проведенного социологического исследования удовлетворенности клиентов услугами ОАО «РЖД» в сфере грузовых перевозок выявлены сильные и слабые стороны организации и внедрения грузовой и коммерческой работы, осуществлена сравнительная оценка лояльности клиентов предоставляемыми сервисами и услугами, определен общий показатель удовлетворенности работой ЦМ. Результат научного исследования показал, что коэффициент лояльности клиентов ОАО «РЖД» ниже, чем у других аналогичных транспортных компаний, при этом отрицательной динамики не наблюдается. Относительно низкий результат показывают следующие характеристики: оперативность, оснащенность техникой, доступность автотранспорта и стоимость услуг. С целью улучшения качества предоставляемых услуг предложен комплекс мероприятий.

В качестве основного фактора, направленного на повышение уровня клиентоориентированности грузовых перевозок предлагается реализация трех ключевых этапов по цифровизации деятельности ЦМ, которые предусматривают:

- цифровую оптимизацию, что будет способствовать расширению возможностей оказания транспортно-логистических услуг для сотрудников, сокращению финансовых издержек;

- применение цифровых инноваций как уникального цифрового продукта с использованием высокотехнологичных ресурсов и сервисов для клиентов;

- цифровую трансформацию, преобразование всей структуры ЦМ, поиск новых способов и решений взаимодействия, формирование единого сквозного информационного потока.

Внедрение современных цифровых технологий в производственную деятельность является одним из ключевых направлений, которое связано со стремительным развитием информационных технологий в России в целом.

Список литературы

1. Стратегия развития Холдинга «РЖД» на период до 2030 года // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <https://volgograd-terkom34.ru/wp-content/uploads/2017/05/Стратегия-развития-ОАО-РЖД-до-2030-года.pdf> (Дата обращения 10.01.2023).

2. Об утверждении концепции клиентоориентированности холдинга «РЖД» в области грузовых перевозок : распоряжение ОАО «РЖД» от 07.12.2016 г. № 2487р. Доступ из локал. сети БД АСПИЖТ.
3. 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.
4. Динец Д.А., Меркулов А.С. Применение принципа управления транспортным коридором к организации деятельности Транссибирской магистрали // Транспортное право и безопасность. 2021. № 3 (39). С. 49–56.
5. Абалонин С.М. Конкурентоспособность транспортных услуг. М. : Академкнига, 2004. 172 с.
6. Оленцевич В.А., Власова Н.В. Оценка удовлетворенности качеством услуг грузовых железнодорожных перевозок // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2021. № 8. С. 187–188.
7. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 10.01.2023).
8. Фирсова О.А. Способы оценки степени риска // Наука-2020. 2012. № 1 (1). С. 155–167.
9. Система мониторинга уровня удовлетворенности клиентов услугами грузовых и пассажирских перевозок (принципы формирования и методы реализации) : утв. Старшим вице-президентом ОАО «РЖД» 21.11.2016 г. № 688р. Доступ из локал. сети БД АСПИЖТ.
10. Перспективы развития в 2022 году // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <https://ar2021.rzd.ru/ru/strategic-report/development-prospects> (Дата обращения 11.01.2023).
11. Годовой отчет 2013 // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <http://ar2013.rzd.ru/ru/development-strategy/strategy-key-trends/> (Дата обращения 11.01.2023).
12. Власова Н.В., Оленцевич В.А. Инновационные подходы к оценке погрузочно-разгрузочных операций на местах общего пользования (на примере Восточного полигона железных дорог) // Постсоветский материк. 2022. № 3 (35). С. 65–75.
13. Оленцевич В.А., Гозбенко В.Е. Задачи приспособления транспортной инфраструктуры к новым технологиям // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2021. № 8. С. 189–190.
14. Перфильева П.В., Кашкарев А.С., Власова Н.В. Инновационные подходы к совершенствованию качества предоставления услуг клиентам железнодорожного транспорта // Современные инновации в науке и технике : сб. науч. ст. 12-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Курск, 2022. С. 193–196.
15. Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Волкова С.Г. Формирование опорной сети транспортно-логистических комплексов // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : сб. тр. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Москва, 2022. С. 177–183.
16. Оленцевич А.А., Игнатъева Е.И., Комаров А.В. Повышение клиентоориентированности системы фирменного транспортного обслуживания ОАО «РЖД» // Молодая наука Сибири. 2020. № 4 (10). С. 87–93.
17. Абрамян А.Э. Процесс цифровой трансформации транспортно-логистического комплекса // Железная дорога: путь в будущее : сб. материалов I Междунар. науч. конф. аспирантов и молодых ученых. Москва, 2022. С. 349–353.
18. Осминин А.Т. О цифровой трансформации процессов планирования и управления грузовыми перевозками на железнодорожном транспорте // Управление эксплуатационной работой на транспорте : сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. СПб, 2022. С. 41–60.
19. Полизтков Д.А., Покровская О.Д. Цифровые технологии на сети железных дорог России // Управление эксплуатационной работой на транспорте : сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. СПб, 2022. С. 132–137.
20. Яньшина И.В. Оценка надежности организационно-технологических процессов инфраструктурных объектов железнодорожного транспорта // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2021. № 3 (58). С. 60–70.
21. Терещина Н.П., Тонг Хонг Фи. Факторы, влияющие на формирование конкурентных преимуществ в сфере транспорта // Транспортное дело России. 2021. № 5. С. 64–66.

References

1. Strategiya razvitiya Kholdinga «RZHD» na period do 2030 goda (Elektronnyi resurs) [Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030 (Electronic resource)]. Available at: <https://volgograd-terkom34.ru/wp-content/uploads/2017/05/Стратегия-развития-ОАО-РЖД-до-2030-года.pdf> (Accessed January 10, 2023).
2. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» ot 07.12.2016 g. № 2487r «Ob utverzhdenii kontseptsii klientoorientirovannosti kholdinga «RZhD» v oblasti gruzovykh perezovok» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 7, 2016 no 2487r «The concept of customer orientation of the Russian Railways Holding in the field of freight transportation»].
3. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Dekompozitsiya osnovnykh biznes-protsessov i zony formirovaniya riskov zheleznodorozhnoi transportnoi sistemy v sfere gruzovykh perezovok [Decomposition of the main business processes and risk zones 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.
4. Dinets D.A., Merkulov A.S. Primenenie printsipa upravleniya transportnym koridorom k organizatsii deyatelnosti Transsibirskoi magistrali [Application of the principle of transport corridor management to the organization of the Trans-Siberian Railway]. *Transportnoe pravo i bezopasnost'* [Transport Law and security], 2021, no. 3 (39), pp. 49–56.
5. Abalonin S.M. Konkurentosposobnost' transportnykh uslug [Competitiveness of transport services]. Moscow: Akademykniga Publ., 2004. 172 p.
6. Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Otsenka udovletvorennosti kachestvom uslug gruzovykh zheleznodorozhnykh perezovok [Assessment of satisfaction with the quality of freight rail transportation services]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technical progress], 2021, no. 8, pp. 187–188.
7. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed January 10, 2023).

8. Firsova O.A. Sposoby otsenki stepeni riska [Methods of risk assessment]. *Nauka-2020* [Science-2020], 2012, no. 1 (1), pp. 155–167.
9. Sistema monitoringa urovnya udovletvorennosti klientov uslugami gruzovykh i passazhirskikh perevozok (printsipy formirovaniya i metody realizatsii) : utv. Starshim vitse-prezidentom OAO «RZhD» 21.11.2016 g. №688r [The system for monitoring the level of customer satisfaction with freight and passenger transportation services (principles of formation and methods of implementation): approved by Senior Vice-President of JSC «Russian Railways» No 688r dated November 21, 2016].
10. Perspektivy razvitiya v 2022 godu (Elektronnyi resurs) [Development prospects in 2022 (Electronic resource)]. Available at: <https://ar2021.rzd.ru/ru/strategic-report/development-prospects> (Accessed January 11, 2023).
11. Godovoi otchet 2013 (Elektronnyi resurs) [Annual Report 2013 (Electronic resource)]. Available at: <http://ar2013.rzd.ru/development-strategy/strategy-key-trends/> (Accessed January 11, 2023).
12. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Innovatsionnye podkhody k otsenke pogruzochno-razgruzochnykh operatsii na mestakh obshchego pol'zovaniya (na primere Vostochnogo poligona zheleznykh dorog) [Innovative approaches to the assessment of loading and unloading operations in public areas (on the example of the Eastern Railway Polygon)]. *Postsovetskii materik* [Post-Soviet continent], 2022, no. 3 (35), pp. 65–75.
13. Olentsevich V.A., Gozbenko V.E. Zadachi prispособleniya transportnoi infrastruktury k novym tekhnologiyam [Problems of adaptation of transport infrastructure to new technologies]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technological progress], 2021, no. 8, pp. 189–190.
14. Perfil'eva P.V., Kashkarev A.S., Vlasova N.V. Innovatsionnye podkhody k sovershenstvovaniyu kachestva pre-dostavleniya uslug klientam zheleznodorozhnogo transporta [Innovative approaches to improving the quality of providing services to railway transport customers]. *Sbornik nauchnykh statei XII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike»* [Proceedings of the Twelfth All-Russian Scientific and Technical Conference with International participation «Modern innovations in science and technology»]. Kursk, 2022, pp. 193–196.
15. Ivankova L.N., Ivankov A.N., Volkova S.G. Formirovanie opornoj seti transportno-logisticheskikh kompleksov [Formation of a backbone network of transport and logistics complexes]. *Sbornik trudov nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte»* [Proceedings of the scientific and practical conference with international participation «Innovative technologies in railway transport»]. Moscow, 2022, pp. 177–183.
16. Olentsevich A.A., Ignat'eva E.I., Komarov A.V. Povyshenie klientoorientirovannosti sistemy firmennogo transportnogo obsluzhivaniya OAO «RZhD» [Improving the customer orientation of the corporate transport service system of JSC «Russian Railways»]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2020, no. 4 (10), pp. 87–93.
17. Abramyana A.E. Protseess tsifrovoi transformatsii transportno-logisticheskogo kompleksa [The process of digital transformation of the transport and logistics complex]. *Sbornik materialov I Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii aspirantov i molodykh uchenykh «Zheleznyaya doroga: put' v budushchee»* [Proceedings of the I International Scientific Conference of Ph.D. students and Young scientists «Railway: the way to the future»]. Moscow, 2022, pp. 349–353.
18. Os'minin A.T. O tsifrovoi transformatsii protsessov planirovaniya i upravleniya gruzovymi perevozkami na zheleznodorozhnom transporte [On the digital transformation of the processes of planning and management of freight transportation in railway transport]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Upravlenie ekspluatatsionnoi rabotoi na transporte»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Management of operational work in transport»]. Saint Petersburg, 2022, pp. 41–60.
19. Poliektov D.A., Pokrovskaya O.D. Tsifrovyye tekhnologii na seti zheleznykh dorog Rossii [Digital technologies on the Russian railways network]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Upravlenie ekspluatatsionnoi rabotoi na transporte»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Management of operational work in transport »]. Saint Petersburg, 2022, pp. 132–137.
20. Yanshina I.V. Otsenka nadezhnosti organizatsionno-tekhnologicheskikh protsessov infrastrukturykh ob"ektov zheleznodorozhnogo transporta [Assessment of the reliability of organizational and technological processes of railway infrastructure facilities]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2021, no. 3 (58), pp. 60–70.
21. Tereshina N.P., Tong Hong Phi. Faktory, vliyayushchie na formirovanie konkurentnykh preimushchestv v sfere transporta [Factors influencing the formation of competitive advantages in the field of transport]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia], 2021, no. 5, pp. 64–66.

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.

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

Information about the authors

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

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

Повышение энергоэффективности работы современного отечественного электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

А.С. Самойлова✉, О.В. Мельниченко

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

✉a.s.samoilova@mail.ru

Резюме

На сегодняшний день разработка новых технологий, направленных на повышение энергоэффективности и энергосбережения, является одним из главных стратегических направлений приоритетного развития Российской Федерации. Так, на современных отечественных электровозах переменного тока реализован режим рекуперативного торможения, который позволяет производить возврат электрической энергии в контактную сеть. Однако существует проблема, связанная с ограничением полного использования четвертой зоны регулирования в режиме рекуперативного торможения из-за значительных потерь электрической энергии на блоках балластных резисторов. С учетом реализуемой специфики построения силовой части электровоза переменного тока авторами предложена возможность повышения энергоэффективности режима рекуперативного торможения электровоза за счет определения допустимого угла регулирования α_p на четвертой зоне регулирования преобразователя, формируемого относительно величин действительных потерь напряжения на блоках балочных резисторов, для обеспечения расширения области регулировочной характеристики инвертора близкой к полной четвертой зоне. Разработанное решение согласовывается с задачей, поставленной ОАО «РЖД» в ряде стратегических распоряжений – снижение расхода электрической энергии электроподвижным составом и повышение его энергоэффективности. По результатам выполненных в статье расчетов установлено расширение регулировочной характеристики инвертора на четвертой зоне регулирования до 25 %, что в свою очередь оказало влияние на повышение в среднем на 10 % величины одного из главных энергетических показателей электровоза переменного тока – коэффициента мощности.

Ключевые слова

электровоз переменного тока, рекуперативное торможение, выпрямительно-инверторный преобразователь, блок балластных резисторов, четвертая зона регулирования, энергоэффективность, коэффициент мощности

Для цитирования

Самойлова А.С. Повышение энергоэффективности работы современного отечественного электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / А.С. Самойлова, О.В. Мельниченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 136–143. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).136-143.

Информация о статье

поступила в редакцию: 30.01.2023 г.; поступила после рецензирования: 6.03.2023 г.; принята к публикации: 7.03.2023 г.

Improving the energy efficiency of a modern domestic AC electric locomotive in the regenerative braking mode

A.S. SamoiloVA✉, O.V. Mel'nichenko

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉a.s.samoilova@mail.ru

Abstract

Today, the development of new technologies aimed at improving energy efficiency and energy saving is one of the main strategic directions for the priority development of the Russian Federation. So, on modern domestic AC electric locomotives, a regenerative braking mode is implemented, which allows the return of electrical energy to the contact network. However, there is a problem associated with limiting the full use of the fourth control zone in the regenerative braking mode due to significant losses of electrical energy in the ballast resistors blocks. Taking into account the specifics of the construction of the power part of the AC electric locomotive, the authors proposed the possibility of increasing the energy efficiency of the regenerative braking mode of the electric locomotive by determining the permissible control angle α_p on the fourth control zone of the converter, which is formed relative to the values of the actual voltage losses on the ballast resistors blocks, to ensure the expansion of the region of the inverter regulated characteristic close to complete fourth zone. The developed solution is consistent with the task set by Russian Railways in a number of strategic orders – reducing the consumption of electric energy by electric rolling stock and increasing its energy efficiency. Based on the results of the calculations performed in the article, an expansion of the regulating characteristic of the inverter in the fourth control zone was established up to 25 %, which in turn had an impact on an average of 10 % increase in the value of one of the main energy indicators of an AC electric locomotive – the power factor.

Keywords

ac electric locomotive, regenerative braking, rectifier-inverter converter, ballast resistor block, fourth regulation zone, energy efficiency, power factor

For citation

Samoilova A.S., Mel'nichenko O.V. Povyshenie energoeffektivnosti raboty sovremennogo otechestvennogo elektrovozza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya [Improving the energy efficiency of a modern domestic AC electric locomotive in the regenerative braking mode]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 136–143. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).136-143.

Article Info

Received: January 30, 2023; Revised: March 6, 2023; Accepted: March 7, 2023.

Введение

В настоящее время электрификация железных дорог является одним из главных направлений инфраструктурного развития железных дорог России. Суммарное расстояние электрифицированных линий железных дорог достигла 44,1 тыс. км – это половина от общей эксплуатационной длины российских железных дорог (86,6 тыс. км) [1]. Перспективы проведения и реализации дальнейшей электрификации железных дорог обусловлены снижением затрат на содержание и обслуживание поездов, а также ростом уровня эксплуатационных показателей работы сети железных дорог: повышение скорости движения и массы грузовых поездов, увеличение плеч обращения локомотивов и др. [2]. При этом для получения максимального экономического эффекта от электрификации российских железных дорог разработан и утвержден ряд федеральных и стратегических распоряжений [3–5], согласно которым остро стоит вопрос развития и создания технологий и устройств по повышению энергоэффективности и энергосбережения отечественного электроподвижного состава. На данный момент один из реализованных способов, направленных на снижение затрат электрической энергии на тягу поездов на современных отечественных электровозах переменного тока является режим рекуперативного торможения, позволяющий осуществлять возврат электрической энергии от электровоза в контактную сеть. Однако на сегодняшний день существует проблема ограничения использования режима рекуперативного торможения, связанная со спецификой построения силовой части современного отечественного электровоза переменного тока, из-за которой имеет место недорекуперлируемая электрическая энергия (ограничение угла регулирования с фазой α_p на четвертой зоне).

Проблема энергоэффективности режима рекуперативного торможения на электровозах переменного тока

В режиме рекуперативного торможения на современных отечественных электровозах переменного тока при автоматическом управлении напряжением выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) четвертая зона регулирования ограничивается 3,5 зонами. Данное ограничение вызвано наличием блоков балластных резисторов (ББР) в цепях тяговых электродвигателей, работающих в режиме генератора. ББР, в свою очередь, необходимы для сохранения электрической устойчивости режима рекуперативного торможения, они обеспечивают увеличение активного сопротивления цепи каждого якоря генератора при их параллельном включении, за счет чего происходит выравнивание тока нагрузки [6]. Однако при возможных максимальных значениях тока якоря генератора на ББР образуются значительные потери напряжения, что приводит к увеличению напряжения на зажимах генератора и невозможности реализации полной четвертой зоны регулирования. В целом потери напряжения на ББР оказывают влияние на снижение коэффициента мощности в среднем на 10% [7, 8], что ухудшает пропускную способность тяговых участков железных дорог.

Учеными и ведущими практиками проведен значительный объем работ и предложены различные технические решения, направленные на повышение энергоэффективности отечественного электроподвижного состава в режиме рекуперативного торможения, за счет создания новых алгоритмов управления, модернизации и переоснащения электрооборудования электровоза [9–19]. Однако в настоящий момент с учетом развития и совершенствования современных отечественных электровозов, а именно с появлением и установкой микропроцессорной системы управления и диагностики

(МСУД) до сих пор осуществляется работа электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения с установленным ограничением – 3,5 зоны регулирования.

Способ повышения энергоэффективности работы электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Целью исследования является повышение коэффициента мощности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения благодаря расширению регулировочной характеристики инвертора на четвертой зоне регулирования за счет автоматического контроля тока якоря генератора и определения текущих потерь напряжения на ББР. В возможном диапазоне тока якоря генератора от 100 до 950 А значения электрических потерь различны. Согласно формуле (1) можно определить величину потерь напряжения на ББР при различных значениях тока якоря генератора:

$$\Delta U = I_d \cdot R_{\text{ББР}}, \quad (1)$$

где I_d – ток якоря генератора, 100–950 А; $R_{\text{ББР}}$ – сопротивление ББР, для современного отечественного электровоза переменного тока серии 2ЭС5К 0,143 Ом.

Результаты расчета величины потерь напряжения на ББР электровоза в режиме рекуперативного торможения при различных значениях тока якоря генератора сведены в табл. 1.

Относительно принятого ограничения 3,5 зоны регулирования ($\alpha_{\text{pmax}} = \pi - \beta_p = 90$ эл. град.) определим величину выпрямленного напряжения инвертора при различных значениях тока якоря генератора по формуле (2):

$$U_{d3,5} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} u_{2(4)} \cdot \left[(1 + \varepsilon) \cdot \cos \delta + (1 - \varepsilon) \cdot \cos \beta_p \right] - \frac{2 \cdot X_T \cdot K_{\text{ТП}} \cdot I_d}{\pi}, \quad (2)$$

Таблица 1. Величина потерь напряжения на блоке балластных резисторов электровоза в режиме рекуперативного торможения

Table 1. The value of voltage losses on the block of ballast resistors of an electric locomotive in the regenerative braking mode

I_d , А	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950
ΔU , В	14,3	28,6	42,9	57,2	71,5	85,8	100,1	114,4	128,7	135,85

Таблица 2. Величина выпрямленного напряжения инвертора при ограничении 3,5 зоны регулирования

Table 2. The value of the rectified voltage of the inverter with a limitation of 3,5 regulation zone

I_d , А	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950
$U_{d3,5}$, В	857,64	855,25	852,86	850,47	848,08	845,08	843,31	840,92	838,53	837,34

где $u_{2(4)}$ – действующее значение напряжения вторичной обмотки тягового трансформатора на четвертой зоне регулирования; ε – отношение действующих значений напряжений вторичной обмотки тягового трансформатора на третьей и четвертой зонах, 0,75; δ – угол запаса инвертора, 30 эл. град.; β_p – регулируемый угол опережения; X_T – индуктивное сопротивление обмоток тягового трансформатора электровоза на четвертой зоне регулирования, 0,05 Ом; $K_{\text{ТП}}$ – отношение коэффициентов трансформации тягового трансформатора электровоза третьей и четвертой зоны, 0,75 [20, 21].

Результаты расчета величины выпрямленного напряжения инвертора при ограничении 3,5 зоны регулирования представлены в табл. 2.

За счет предлагаемого способа управления, с учетом текущих потерь напряжения на ББР формируется новая величина угла регулирования α_p , позволяющая расширить регулировочную характеристику инвертора на четвертой зоне регулирования. Полученная расчетная величина угла регулирования α_p позволит повысить напряжение инвертора до 25 %. При таких условиях α_p будет определяться по формуле (3):

$$\alpha_p = \cos^{-1} \frac{\left[\left(U_{d3,5} + \frac{R_{\text{ББР}} \cdot (1000 - I_d) \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} \right) + \frac{2 \cdot X_T \cdot K_{\text{ТП}} \cdot I_d}{\pi} \right] \frac{\pi}{\sqrt{2}} - (1 + \varepsilon) \cdot \cos \delta}{u_{2(4)} (1 - \varepsilon)}. \quad (3)$$

Результаты расчета величины угла регулирования α_p для реализации расширения зоны близкой к полной четвертой сформированы в табл. 3.

В результате увеличения регулировочной характеристики четвертой зоны при принятом угле регулирования α_p величина выпрямленного напряжения инвертора опреде-

ляется по формуле (2), результаты расчета представлены в табл. 4.

На основании полученных результатов расчетов на рис. 1 построена регулировочная характеристика ВИП $U_d^{I_{100+950}} = f(\alpha_p)$ при типовом и предлагаемом способах управления в

режиме рекуперативного торможения на четвертой зоне регулирования, показывающая что при контроле тока якоря генератора и учете действительных потерь напряжения на ББР возможно увеличение четвертой зоны регулирования в режиме рекуперативного торможения на 25 %.

Таблица 3. Величина угла регулирования α_p для реализации расширения зоны близкой к полной четвертой

Table 3. The value of the angle of regulation α_p to implement the expansion of the zone close to the full fourth

I_d, A	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950
$\Delta U, B$	14,3	28,6	42,9	57,2	71,5	85,8	100,1	114,4	128,7	135,85
$U_{d3,5}, B$	857,64	855,25	852,86	850,47	848,08	845,08	843,31	840,92	838,53	837,34
$\alpha_p, \text{эл. град.}$	114	111	109	106	103	100	98	95	93	91

Таблица 4. Величина выпрямленного напряжения инвертора при регулировании зоны близкой к полной четвертой зоне

Table 4. The value of the rectified voltage of the inverter when regulating the zone close to the full fourth zone

$\alpha_p, \text{эл. град.}$	114	111	109	106	103	100	98	95	93	91
U_{d4}, B	915,66	906,75	897,98	889,06	880,29	871,52	862,6	853,83	844,91	840,6

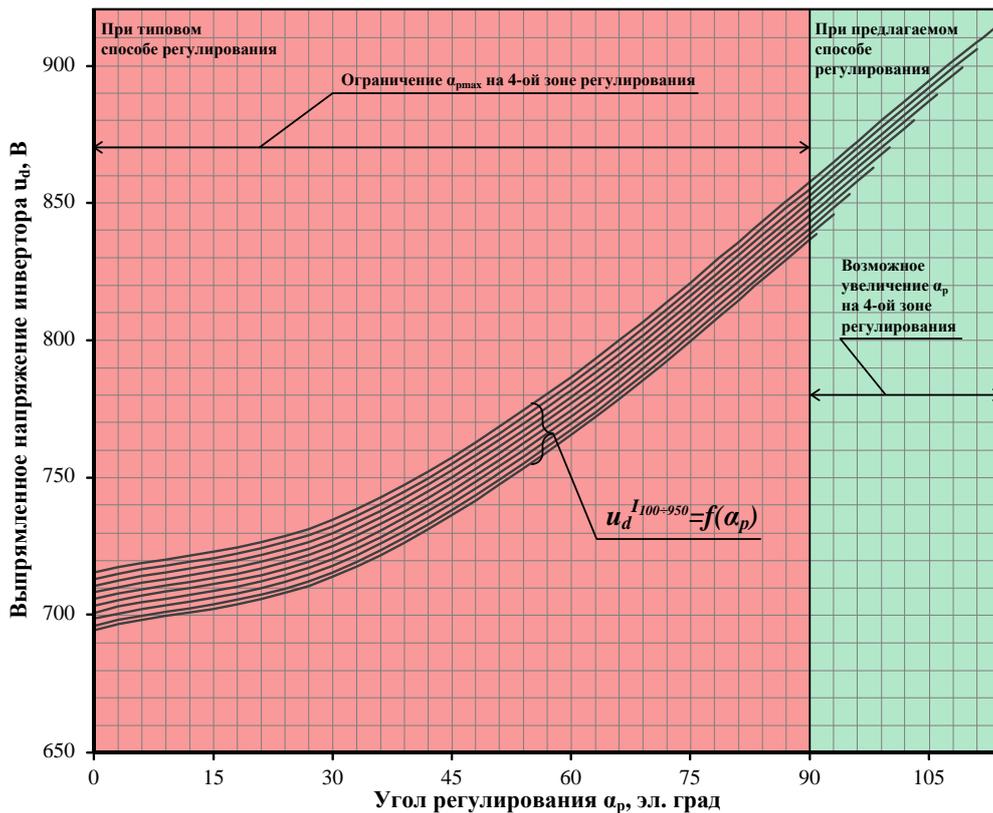


Рис. 1. Регулировочная характеристика выпрямительно-инверторного преобразователя $U_d^{I_{100+950}} = f(\alpha_p)$ при типовом и предлагаемом способах управления в режиме рекуперативного торможения на четвертой зоне регулирования

Fig. 1. Regulating characteristic of the rectifier-inverter converter $U_d^{I_{100+950}} = f(\alpha_p)$ with typical and proposed control methods in regenerative braking mode in the fourth control zone

Одним из основных энергетических показателей работы электровоза, характеризующих его энергоэффективность, является коэффициент мощности K_M . Рассмотрим влияние расширения области регулирования инвертора свыше ограничения 3,5 зоны на коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения.

Коэффициент мощности электровоза определяется по формуле (4):

$$K_M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U_d I_d}{U_{d4} I_T}, \quad (4)$$

где U_d / U_{d4} – отношение среднего значения выпрямленного напряжения на четвертой зоне регулирования с учетом углов α_p и δ к наибольшему значению выпрямленного напряжения на четвертой зоне регулирования при $\alpha_p = \pi$ (полная зона); I_d / I_T – отношение среднего значения выпрямленного тока к действующему значению переменного тока, приведенного к вторичной обмотке тягового трансформатора [22].

Действующее значение переменного тока, приведенного к вторичной обмотке тягового трансформатора, рассчитывается по формуле (5):

$$I_T = K_{\text{эф}} K_{d\text{эф}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\int_{\pi-\delta}^{2\pi-\alpha_p} (I_d)^2 d\omega t + \int_{2\pi-\alpha_p}^{2\pi-\delta} (\varepsilon I_d)^2 d\omega t \right]}, \quad (5)$$

где $K_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективности переменного тока, 0,97; $K_{d\text{эф}}$ – коэффициент эффективности выпрямленного тока, 1,016.

В формуле (5) выполняются преобразования в соответствии с значениями углов α_p и δ , результат сформирован в виде выражения (6):

$$\frac{I_d}{I_T} = \frac{1}{K_{\text{эф}} K_{d\text{эф}} \sqrt{\frac{\pi + (\varepsilon^2 - 1) \cdot (\beta_p - \delta)}{\pi}}}. \quad (6)$$

Таблица 5. Результаты расчета коэффициента мощности для типового и предлагаемого способов управления выпрямительно-инверторным преобразователем электровоза в режиме рекуперативного торможения на четвертой зоне регулирования

Table 5. The results of calculating the power factor for the typical and proposed methods of control of the rectifier-inverter converter electric locomotive in the regenerative braking mode in the fourth control zone

I_d, A		100	200	300	400	500	600	700	800	900	950
Типовой Typical	$U_d,$ В	857,64	855,25	852,86	850,47	848,08	845,08	843,31	840,92	838,53	837,34
	K_M	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
Предлагаемый Proposed	$U_d,$ В	915,66	906,75	897,98	889,06	880,29	871,52	862,6	853,83	844,91	840,6
	K_M	0,7	0,69	0,69	0,68	0,68	0,67	0,67	0,67	0,66	0,66

В итоге коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения на четвертой зоне при зонно-фазовом регулировании напряжения будет определяться по формуле (7):

$$K_M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U_d}{U_{d4} K_{\text{эф}} K_{d\text{эф}} \sqrt{\frac{\pi + (\varepsilon^2 - 1) \cdot (\beta_p - \delta)}{\pi}}}. \quad (7)$$

Произведем расчет коэффициента мощности для типового и предлагаемого способов управления ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения, результаты сводим в табл. 5.

На рис. 2 представлена зависимость $K_M^{I_{100+950}} = f(\alpha_p)$ при типовом и предлагаемом способах управления ВИП электровоза на четвертой зоне регулирования в режиме рекуперативного торможения. В результате расчета (см. табл. 5) повышение коэффициента мощности составило в среднем 10 % при применении предлагаемого способа управления ВИП на четвертой зоне регулирования в режиме рекуперативного торможения.

Заключение

По результатам расчетов параметров работы режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока на четвертой зоне регулирования с применением предлагаемого способа получены следующие показатели:

- расширение регулировочной характеристики инвертора до 25 %;
- повышение коэффициента мощности в среднем на 10 %.

Также определение величины угла регулирования $f(\alpha_p)$, обеспечивающего возможность расширения регулировочной характеристики инвертора на четвертой зоне регулирования, способствует увеличению возврата электриче-

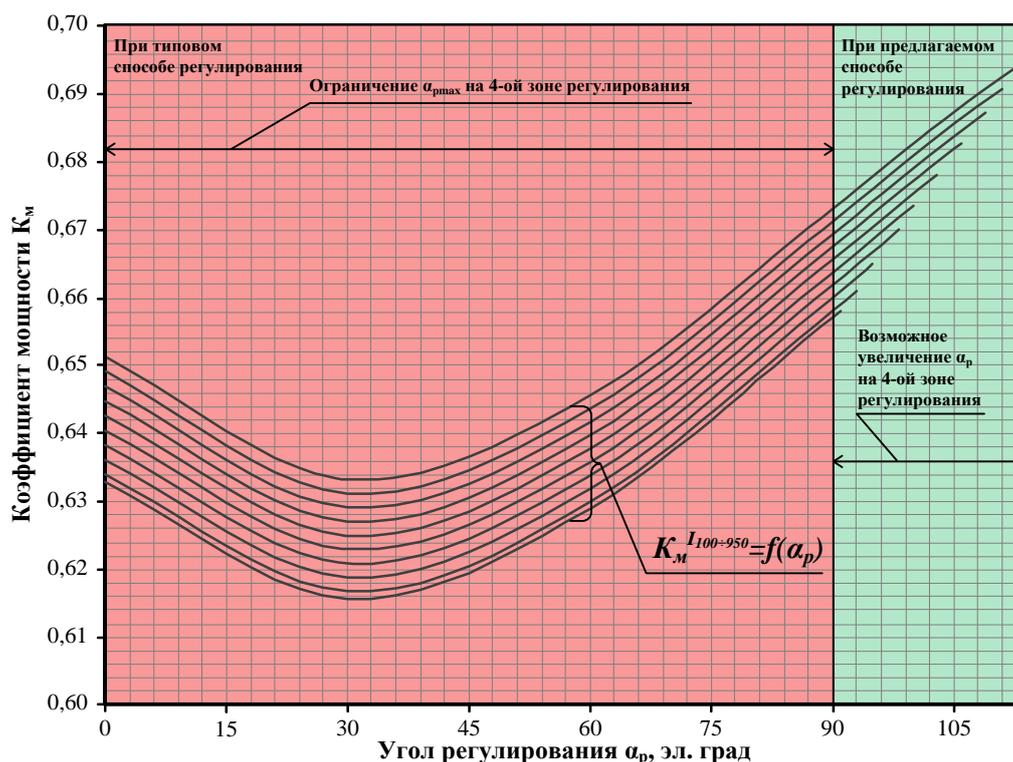


Рис. 2. Зависимость $K_M^{I_{100-950}} = f(\alpha_p)$ при типовом и предлагаемом способе управления выпрямительно-инверторным преобразователем электровоза в режиме рекуперативного торможения на четвертой зоне регулирования

ской энергии в контактную сеть и повышению скорости движения поезда по участку, что в целом позволяет снизить расходы энергии на тягу поездов.

Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики : сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru> (Дата обращения 9.01.2023).
2. Долгосрочные перспективы электрификации сети российских железных дорог // Евразия Вести : сайт. URL : <http://eav.ru/publ1.php?publid=2017-11a07> (Дата обращения 9.01.2023).
3. Об утверждении энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года : распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2537р. Доступ из справ.-прав. системы «АС-ПИЖТ» в локальной сети.
4. Об утверждении стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : распоряжение ОАО «РЖД» от 17.04.2018 № 769/р. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
5. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 19.03.2019 № 466 (ред. 13.10.2022). URL : <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201903210017> (Дата обращения 10.01.2023).
6. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации (в 2 т.). Новочеркасск : Новочеркасский электровагоностроительный завод, 2007.
7. Трахтман Л.М. Электрическое торможение электроподвижного состава. М. : Транспорт, 1965. 204 с.
8. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М. : Транспорт, 1988. 310 с.
9. Власьевский С.В. Повышение эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей электровазозов переменного тока с рекуперативным торможением : дис. ... д-ра техн. наук. Хабаровск, 2001. 396 с.
10. Способ повышения энергетической эффективности электровазоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / Е.В. Буняева, В.Г. Скорик, С.В. Власьевский и др. // Электротехника. 2016. № 2. С. 17–20.
11. Савоськин А.Н., Пудовиков О.Е., Гарбузов И.И. Анализ электромагнитных процессов в тяговой сети при взаимодействии электровазозов в режимах рекуперации и тяги // Электротехника. 2014. № 5. С. 47–52.
12. Власьевский С.В., Кравчук В.В. Эффективность и проблемы применения рекуперативного торможения на электровазозах переменного тока // Вестн. Всерос. науч.-исслед. и проект.-констр. ин-та электровазозостроения. 2005. № 2 (49). С. 147–158.

13. Соловьев В.А., Малукова А.И., Власьевский С.В. Выравнивание нагрузок в параллельных цепях тяговых двигателей, работающих в режиме генератора, и снижение энергетических потерь электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Информатика и системы управления. 2013. № 3 (37). С. 168–174.
14. Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Духовников В.К. Управляемый компенсатор реактивной мощности электровоза // Электротехника. 2014. № 2. С. 25–29.
15. Кабалык Ю.С. Снижение влияния электровозов переменного тока на форму напряжения в тяговой сети электрифицированных железных дорог : дис. ... канд. техн. наук. Хабаровск, 2010. 177 с.
16. Линьков А.О. Совершенствование выпрямительной установки возбуждения тяговых двигателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2015. 177 с.
17. Яговкин Д.А., Мельниченко О.В., Портной А.Ю. ВИП электровоза на IGBT модулях для 1-ой зоны регулирования в режиме рекуперативного торможения // Вестн. ин-та тяги и подвижн. состава. 2013. № 9. С. 44–47.
18. Власьевский С.В. Электрическое рекуперативное торможение на электровозах переменного тока магистральных железных дорог. Проблемы и эффективность его применения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2006. № 1. С. 21–24.
19. Кучумов В.А., Никончук И.Н. О реализации рекуперативного торможения на электровозе переменного тока с однофазным обратимым преобразователем напряжения // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2022. Т. 81. № 1. С. 31–37.
20. Мельниченко О.В., Власьевский С.В. Повышение энергетической эффективности работы электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2014. Т. 1. № 2 (18). С. 19–27.
21. Мельниченко О.В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока : дис. ... д-ра техн. наук. Хабаровск, 2015. 392 с.
22. Шрамко С.Г. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения за счет изменения параметров балластных резисторов : дис. ... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2016. 142 с.

References

1. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki (Elektronnyi resurs) [Federal State Statistics Service (Electronic resource)]. URL: <https://rosstat.gov.ru> (Accessed January 9, 2023).
2. Dolgosrochnye perspektivy elektrifikatsii seti rossiiskikh zheleznykh dorog (Elektronnyi resurs) [Long-term prospects of electrification of the Russian railway network (Electronic resource)]. Available at: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2017-11a07> (Accessed January 9, 2023).
3. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 14.12.2016 № 2537r «Ob utverzhdenii energeticheskoi strategii kholdinga «Rossiiskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 14, 2016 No 2537r «On the approval of the energy strategy of the holding «Russian Railways» for the period up to 2020 and for the future up to 2030»].
4. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 17.04.2018 № 769r «Ob utverzhdenii strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga)» [Order of JSC «Russian Railways» dated April 17, 2018 No 769r «On the approval of the strategy of scientific and technological development of the Russian Railways Holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Paper)»].
5. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 19.03.2019 № 466 (red. 13.10.2022) «Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO «RZHD» do 2025 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation. Federation dated March 19, 2019 No 466 (ed. October 13, 2022) «Long-term development program of JSC «Russian Railways» until 2025»]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201903210017> (Accessed January 10, 2023).
6. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii (v 2 t.) [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Operation manual (in 2 vol.)]. Novocherkassk : Novocherkasskii elektrovozo-stroitel'nyi zavod Publ., 2007.
7. Trakhtman L.M. Elektricheskoe tormozhenie elektropodvizhnogo sostava [Electric braking of electric rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1965. 204 p.
8. Tikhmenev B.N., Kuchumov V.A. Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with thyristor converters]. Moscow: Transport Publ., 1988. 310 p.
9. Vlas'evskii S.V. Povyshenie effektivnosti vypryamitel'no-invertornykh preobrazovatelei elektrovozov peremennogo toka s rekuperativnym tormozheniem [Improving the efficiency of rectifier-inverter converters of AC electric locomotives with regenerative braking]. Doctor's thesis. Khabarovsk, 2001. 396 p.
10. Bunyaeva E.V., Skorik V.G., Vlas'evskii S.V., Fokin D.S. Sposob povysheniya energeticheskoi effektivnosti elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya [A method for increasing the energy efficiency of an alternating current electric locomotive in the mode of regenerative braking]. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2016, no. 2, pp. 17–20.
11. Savos'kin A.N., Pudovikov O.E., Garbuzov I.I. Analiz elektromagnitnykh protsessov v tyagovoi seti pri vzaimodeistvii elektrovozov v rezhimakh rekuperatsii i tyagi [Analysis of electromagnetic processes in the traction network during the interaction of electric locomotives in recovery and traction modes]. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2014, no. 5, pp. 47–52.
12. Vlas'evskii S.V., Kravchuk V.V. Effektivnost' i problemy primeneniya rekuperativnogo tormozheniya na elektrovozhakh peremennogo toka [Efficiency and problems of application of regenerative braking on alternating current electric locomotives]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozoostroeniya* [Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Electric Locomotive Building], 2005, no. 2 (49), pp. 147–158.
13. Solov'ev V.A., Malyukova A.I., Vlas'evskii S.V. Vyravniwanie nagruzok v parallel'nykh tseyakh tyagovykh dvigatelei, rabotayushchikh v rezhime generatora, i snizhenie energeticheskikh poter' elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekupera-

ativnogo tormozheniya [Equalization of loads in parallel circuits of traction motors operating in generator mode and reduction of energy losses of an alternating current electric locomotive in regenerative braking mode]. *Informatika i sistemy upravleniya* [Computer science and control systems], 2013, no. 3 (37), pp. 168–174.

14. Savos'kin A.N., Kulinich Yu.M., Dukhovnikov V.K. Upravlyayemyi kompensator reaktivnoi moshchnosti elektrovoza [Controlled electric locomotive reactive power compensator]. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2014, no. 2, pp. 25–29.

15. Kabalyk Yu.S. Snizhenie vliyaniya elektrovozov peremennogo toka na formu napryazheniya v tyagovoi seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Reduction of the influence of AC electric locomotives on the form of voltage in the traction network of electrified railways]. Ph.D.'s thesis. Khabarovsk, 2010. 177 p.

16. Lin'kov A.O. Sovershenstvovanie vypryamitel'noi ustanovki vozbuzhdeniya tyagovykh dvigatelei elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya [Improvement of the rectifier system for excitation of traction motors of an alternating current electric locomotive in the mode of regenerative braking]. Ph.D.'s thesis. Omsk, 2015. 177 p.

17. Yagovkin D.A., Mel'nichenko O.V., Portnoi A.Yu. VIP elektrovoza na IGBT modulyakh dlya 1-oi zony regulirovaniya v rezhime rekuperativnogo tormozheniya [Rectifier-inverter converter of electric locomotive on IGBT modules for the 1st control zone in regenerative braking mode]. *Vestnik instituta tyagi i podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Institute of traction and rolling stock], 2013, no. 9, pp. 44–47.

18. Vlas'evskii S.V. Elektricheskoe rekuperativnoe tormozhenie na elektrovozakh peremennogo toka magistral'nykh zheleznykh dorog. Problemy i effektivnost' ego primeneniya [Electric regenerative braking on AC electric locomotives of mainline railways. Problems and effectiveness of its application]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2006, no. 1, pp. 21–24.

19. Kuchumov V.A., Nikonchuk I.N. O realizatsii rekuperativnogo tormozheniya na elektrovoze peremennogo toka s odnofaznym obratimym preobrazovatelem napryazheniya [On the implementation of regenerative braking on an AC electric locomotive with a single-phase reversible voltage converter]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific-Research Institute of Railway transport], 2022, vol. 81, no. 1, pp. 31–37.

20. Mel'nichenko O.V., Vlas'evskii S.V. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti raboty elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya [Improving the energy efficiency of an AC electric locomotive in the regenerative braking mode]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo Universiteta* [Scientific notes of Komsomol'sk-on-Amur State Technical University], 2014, vol. 2, no. 2 (18), pp. 19–27.

21. Mel'nichenko O.V. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti tyagovykh elektroprivodov elektrovozov peremennogo toka [Improving the energy efficiency of traction electric drives of electric locomotives of alternating current]. Doctor's thesis. Khabarovsk, 2015. 392 p.

22. Shramko S.G. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti elektrovozov peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya za schet izmeneniya parametrov ballastnykh rezistorov [Increasing the energy efficiency of AC electric locomotives in the regenerative braking mode by changing the parameters of ballast resistors]. Ph.D.'s thesis. Komsomolsk-on-Amur, 2016. 142 p.

Информация об авторах

Самойлова Анастасия Сергеевна, кафедра электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: a.s.samoilova@mail.ru.

Мельниченко Олег Валерьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

Information about the authors

Anastasia S. Samoilo, Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: a.s.samoilova@mail.ru.

Oleg V. Mel'nichenko, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

Перспективное развитие теории электромагнитных, энергетических процессов и совершенствование технологии электрической тяги

Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев✉, В.А. Тихомиров, А.Д. Зарубин

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

✉astrahancev1943@mail.ru

Резюме

В России и за рубежом изготавливается полупроводниковая техника, которая сокращает продолжительность необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии. Недостаток известных технических решений является причиной снижения энергетической эффективности оборудования и генерирования электромагнитных помех в электроэнергетической системе обеспечения электрической тяги. В Иркутском государственном университете путей сообщения разработана новая теория электромагнитных и энергетических процессов в электрических цепях с полупроводниковой техникой. Аналитически обоснованы направления энергосберегающего использования централизованных и автономных источников энергии для электрической тяги. Предложены технические решения для непрерывной передачи электрической энергии от ее источника к оборудованию электрической тяги. Для проверки научной теории выполнены расчеты с помощью разработанных энергетических характеристик, спектрального анализа, компьютерного моделирования, а также программы MatLab в среде Simulink. На примере электрической тяги поездов доказана возможность повышения коэффициента полезного действия электрической тяги на 15,3 %, увеличения суммарной массы поездов в 3,3 раза и повышения скорости движения на 32,5 % по сравнению с тягой поездов на переменном токе напряжением 25 кВ и частотой 50 Гц. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в контактной сети не превышает 0,98 %. Результаты выполненного исследования указывают на перспективность значительного увеличения производительности транспортных работ, повышения их энергетической эффективности и снижения электромагнитных помех за счет совершенствования технологии электрической тяги. Достоинством теоретически обоснованного направления совершенствования технологии электрической тяги с питанием от автономных источников энергии является возможность увеличения ресурса автономных источников энергии и пробега электромобилей за счет снижения загрузки током источников энергии.

Ключевые слова

спектральный анализ, гармонические составляющие, трехфазный асинхронный двигатель, электрическая тяга

Для цитирования

Перспективное развитие теории электромагнитных, энергетических процессов и совершенствование технологии электрической тяги / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев, В.А. Тихомиров, А.Д. Зарубин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 144–155. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).144-155.

Информация о статье

поступила в редакцию: 28.02.2023 г.; поступила после рецензирования: 22.03.2023 г.; принята к публикации: 23.03.2023 г.

Prospective development of the theory of electromagnetic, energy processes and improvement of electric traction technology

N.L. Ryabchenok, T.L. Alekseeva, L.A. Astrakhantsev✉, V.A. Tikhomirov, A.D. Zarubin

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉astrahancev1943@mail.ru

Abstract

Semiconductor technology that shortens the duration of irreversible conversion of electrical energy into another form of energy is produced in Russia and abroad. Popular technical solutions have disadvantages. They are the cause of reduced energy efficiency of the equipment and the generation of electromagnetic interference in the electrical power system for electric traction. The Irkutsk State Transport University has developed a new theory of electromagnetic and energy processes in electrical circuits with semiconductor technology. Analytically justified directions for energy-saving use of centralized and autonomous energy sources for electric traction. Technical solutions are proposed for the continuous transmission of electrical energy from the power source to the electric traction equipment. Calculations were made to test the scientific theory using the developed energy characterisation, spectral analysis, computer modelling, and MATLAB software in Simulink. Using electric train traction as an example, the possibility of increasing the efficiency of electric traction by 15,3 %, increasing the total train mass by 3.3 times and increasing the speed by 32,5 % as compared to AC traction with 25 kV 50 Hz is proved. The total harmonic voltage component ratio in the overhead line is less than 0,98 %. The results of this study indicate that it is possible to significantly increase the productivity of transport operations, improve energy efficiency and reduce electromagnetic interference. This is possible by improving electric

traction technology. The direction for improving electric traction technology powered by autonomous energy sources is theoretically proven. Among the advantages of this trend is the possibility of increasing the autonomous energy resource and mileage of electric vehicles by reducing the current load on energy sources.

Keywords

spectrum analysis, harmonic components, three-phase induction motor, electric traction

For citation

Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhansev L.A., Tikhomirov V.A., Zarubin A.D. Perspektivnoe razvitiye teorii elektromagnitnykh, energeticheskikh protsessov i sovershenstvovanie tekhnologii elektricheskoi tyagi [Prospective development of the theory of electromagnetic, energy processes and improvement of electric traction technology]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 144–155. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).144-155.

Article info

Received: February 28, 2023; Revised: March 22, 2023; Accepted: March 23, 2023.

Введение

В настоящее время применяется теория для оценки электромагнитных и энергетических процессов в электрических цепях синусоидального тока, которая основана на теореме Умова – Пойнтинга [1, 2]. Известно, что в электрических цепях синусоидального тока с реактивными элементами, которые накапливают энергию магнитного или электрического поля, кривая мгновенных значений тока i смещается по фазе на угол φ относительно кривой мгновенных значений напряжения u [3, 4]. Полупроводниковые регуляторы мощности (ПРМ), выпрямители являются генераторами несинусоидального тока, а при импульсно-фазовом управлении технологическими процессами мгновенные значения тока i_1 смещаются по фазе на угол φ_1 относительно кривой мгновенных значений напряжения u_1 силовыми полупроводниковыми приборами (СПП) ПРМ [5], которые работают в ключевом режиме (рис. 1) и не являются накопителями энергии.

Для устранения отрицательного воздействия на распределительную электрическую сеть (РЭС), линию электропередач (ЛЭП) и источник энергии G применяются компенсаторы реактивной мощности (КРМ), а преобразовательные трансформаторы используются в качестве фильтра и для согласования напряжения.

Для расчета полной (кажущейся) мощности S на входе ПРМ с нагрузкой вместо несинусоидального действующего напряжения U применяется эквивалентное действующее значение основной гармоники напряжения U_1 с амплитудой $U_{m1} = \sqrt{2} \cdot U$ и частотой, равной частоте несинусоидального напряжения U . Действующий несинусоидальный ток I записывается в виде спектра гармонических составляющих с выделением действующего значения первой гармоники тока I_1 из суммы n действующих значений высших гармоник тока I_k (n – номер последней учитываемой гармоники):

$$I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{k=2}^n I_k^2};$$

$$S = UI = U_1 \cdot \sqrt{I_1^2 + \sum_{k=2}^n I_k^2} = \sqrt{U_1^2 \cdot I_1^2 + U_1^2 \cdot \sum_{k=2}^n I_k^2} \quad (1)$$

Ортогональные составляющие первого слагаемого под корнем квадратным в выражении (1) можно получить, если умножить его на тригонометрическую единицу $\cos^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_1 = 1$, тогда:

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + T^2}, \quad (2)$$

где $P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ – активная мощность первой гармоники тока и основной гармоники

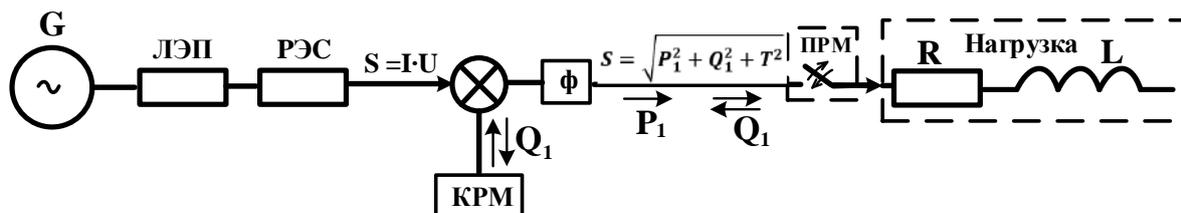


Рис. 1. Структурная схема электромагнитных, энергетических процессов
Fig. 1. Structure diagram of electromagnetic, energy processes

напряжения, характеризующая электрическую энергию, необратимо преобразованную в иной вид энергии; $Q_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$ – мощность сдвига (реактивная) первой гармоники тока и основной гармоники напряжения, характеризующая электрическую энергию, которая формируется на входе ПРМ из-за работы ПРМ и из-за накопителей электрической энергии;

$$T = \sqrt{U_1^2 \cdot \sum_{k=2}^n I_k^2} \text{ – мощность искажения (реактивная),}$$

создаваемая основной гармоникой напряжения и высшими гармониками тока.

Известной теорией электромагнитных и энергетических процессов предусмотрен учет аналитическими зависимостями (1) и (2) смещения по фазе кривой мгновенных значений тока относительно кривой мгновенных значений напряжения и нелинейных искажений электрических величин, поэтому данные физические явления приняты за причины снижения энергетической эффективности системы (см. рис. 1) и ухудшения электромагнитной совместимости оборудования системы. Теоремой Умова – Пойнтинга учитывается сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии из-за времени, затрачиваемого на энергообмен между реактивными накопителями энергии в электрической цепи и ее источниками. Снижение напряжения на выходе ПРМ (см. рис. 1), сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии и их влияние на электромагнитные, энергетические процессы в системе электрической тяги целесообразно учитывать при выполнении дальнейшего исследования.

Задачами данного исследования являются:

- разработка теории электромагнитных, энергетических процессов с аналитической оценкой сокращения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии из-за непроводящего состояния СПП и коммутации тока в ПРМ;

- обоснование перспективных направлений совершенствования технологий электрической тяги.

Теоретическое обоснование

Основная часть электрической энергии источника G (см. рис. 1) через ЛЭП, РЭС поступает в нагрузку, где электрическая энергия не-

обратимо преобразуется в иной вид энергии, а управление технологическим процессом выполняется с помощью ПРМ. Современные ПРМ в основном изменяют напряжение на нагрузке по сравнению с напряжением на входе путем периодического прерывания тока, поступающего к нагрузке [6–10]. Так как продолжительность необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии сокращается, а работа сторонних сил по выработке энергии в источнике и передаче ее через систему электропитания выполняется и обеспечивается напряжение на входе ПРМ, то снижается энергетическая эффективность системы в целом. Из-за периодической коммутации тока ухудшается электромагнитная совместимость ПРМ с системой электропитания.

Уточненным законом сохранения энергии в электромагнитном поле [11] предложено аналитически оценивать влияние сокращения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии не только реактивными потребителями электрической энергии, но и коммутационным оборудованием. Разработка новых энергетических характеристик выполнена на основе уточненного закона сохранения энергии в электромагнитном поле, второго закона Кирхгофа и спектрального анализа тока, напряжения [12].

Для учета изменения действующего напряжения на нагрузке (рис. 2) относительно действующего несинусоидального напряжения U на входе ПРМ и действующего несинусоидального тока I , кривые мгновенных значений несинусоидального тока, напряжения на входе и на выходе ПРМ представлены рядами Фурье:

$$\begin{aligned} \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2 - \sum_{k=0}^n U_{Pk}^2} &= \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{Ck}^2}; \\ \sqrt{U^2 - U_P^2} &= U_C; \\ \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} &= I. \end{aligned} \quad (3)$$

где U_k , – действующее значение k -й гармоники напряжения на входе ПРМ; U_{Pk} – действующее значение k -й гармоники напряжения на входе ПРМ во время непроводящего состояния СПП и коммутации тока в ПРМ; U_P – действующее напряжение на входе ПРМ во время непроводящего состояния СПП и коммутации тока в ПРМ; U_{Ck} – действующее значение k -й гармоники

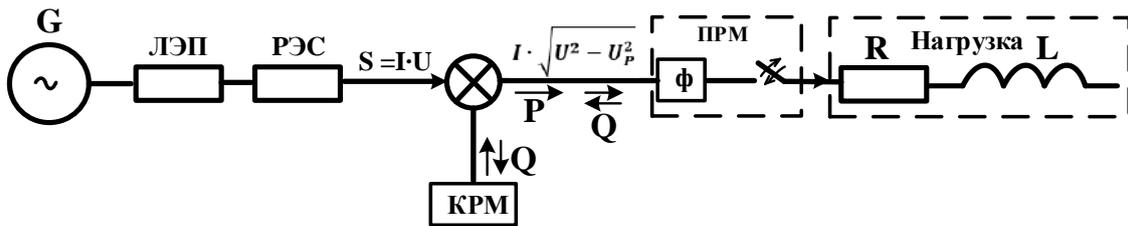


Рис. 2. Структурная схема электромагнитных, энергетических процессов с оценкой использования напряжения для выполнения работы

Fig. 2. Structure diagram of electromagnetic, energy processes with an assessment of the use of voltage to perform the work

напряжения на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП; U_C – действующее напряжение на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП; I_k – действующий ток k -й гармоники; k – номер гармоники; n – номер последней учитываемой гармоники.

Полная (кажущаяся) мощность на входе ПРМ:

$$S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U \cdot I, \quad (4)$$

где U_k , I_k – действующие значения одноименных k -х гармоник напряжения и тока, а сумма произведений разноименных k -х гармоник напряжения и тока равна нулю.

Часть полной мощности на входе ПРМ во время непроводящего состояния СПП и коммутации тока в ПРМ, выраженная через действующие значения напряжения и тока:

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{Pk}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U_P \cdot I. \quad (5)$$

Мощность ΔS представляет собой составляющую полной мощности S на входе ПРМ, характеризующая ту часть электрической энергии источников, системы электроснабжения, которую нельзя преобразовать в иной вид энергии или с помощью этой части энергии обеспечивать энергообмен в электрической цепи, так как напряжение U_P прикладывается к ПРМ во время непроводящего состояния его силовых элементов или расходуется на потери активной мощности во время коммутации тока в ПРМ.

Активная мощность (или среднее значение полной мощности на входе ПРМ), характеризующая часть электрической энергии, необратимо преобразованной в иной вид энергии в нагрузке и в ПРМ:

$$P = U_{C0} \cdot I_0 + \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k, \quad (6)$$

где U_{C0} – постоянная составляющая напряжения на

входе ПРМ во время проводящего состояния СПП; I_0 – постоянная составляющая тока на входе ПРМ; φ_k – угол сдвига по фазе k -й гармоники тока относительно одноименной k -й гармоники напряжения.

Реактивная мощность на входе ПРМ, характеризующая часть электрической энергии, которая затрачена на энергообмен между реактивными накопителями электрической энергии и между источником энергии:

$$Q = \pm \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k. \quad (7)$$

Интегральный аргумент φ_Σ полной мощности на входе ПРМ и входного электрического сопротивления ПРМ с нагрузкой рассчитывается по формуле:

$$\varphi_\Sigma = \arctg \frac{Q}{P} = \arctg \left[\frac{\pm \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k}{(U_{C0} \cdot I_0 + \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k)} \right]. \quad (8)$$

Баланс мощностей (9) с учетом эффективности использования электрического потенциала на входе ПРМ:

$$\begin{aligned} \sqrt{S^2 - \Delta S^2} &= \sqrt{P^2 + Q^2}; \\ I \cdot \sqrt{U^2 - U_P^2} &= \sqrt{P^2 + Q^2}; \\ I &= \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{U^2 - U_P^2}}. \end{aligned} \quad (9)$$

С применением теории электромагнитных и энергетических процессов (3)–(9) устраняются методологические противоречия в системе (см. рис. 1), выражения (1) и (2) согласуются с положениям фундаментальной электротехники [13–16]. Назначение фильтра, КРМ сводится к улучшению формы кривых мгновенных значений тока, напряжения и устранению сдвига по фазе кривой тока относительно напряжения в системе, т.е. к снижению последствий от сокращения продолжительности использования

напряжения системы электроснабжения для выполнения работы. С помощью выражений (3)–(9) доказано, что причиной неудовлетворительной энергетической эффективности и электромагнитной совместимости известных ПРМ, выпрямителей являются паузы во время передачи напряжения от генератора к нагрузке, сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии. Для реализации энергосберегающих электрифицированных технологических процессов в каждой технологической операции и в целом в электрической тяге (рис. 3) снижается величина тока (9). Например, в электрической тяге поездов на железной дороге это обеспечивается, если повышается напряжение U , исключаются паузы, потери напряжения U_p , а тяга поездов выполняется на постоянном токе высокого напряжения.

Для решения задачи энергоэффективного необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии необходимо разрабатывать высокотехнологичную электронную технику [17, 18], с помощью которой поток электрической энергии от источника непрерывно передается к приемнику энергии. Регулятор мощности должен поддерживать интегральный аргумент φ_{Σ} полной мощности на входе ПРМ и входного электрического сопротивления (8) близким к нулю. Для управления реактивной мощностью с помощью ПРМ целесообразно обеспечивать $\varphi_{\Sigma} \approx \pi/2$.

Метод и результаты исследования

Исследованием технологии электрической тяги поезда массой 7 500 т на переменном токе напряжением 25 кВ, частотой 50 Гц получен коэффициент мощности на шинах тяговой подстанции 0,87, а коэффициент полезного действия (КПД) электрической тяги составил $\eta = 74,2\%$. Из-за падения напряжения в контактной сети переменного тока, в силовом оборудовании электроподвижного состава (ЭПС) и отклонения напряжения на 31 % от номинального на обмотках тяговых электродвигателей (ТЭД) трех секционного электровоза скорость движения составляет 43 км/ч в середине межподстанционной зоны. В контактной сети переменного тока суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (ТНД) составляет 17,8 %, а полученные результаты подтверждаются данными из отчетов эксплуатационной работы структурных организаций железной дороги [19].

Значительное увеличение массы поезда, скорости движения, повышение энергетической эффективности и электромагнитной совместимости оборудования достигается за счет применения электрической тяги на постоянном токе высокого напряжения. В системе тягового электроснабжения можно применить токоведущие части контактной подвески ПБСМ-95, МФ-100, А-185, которая эксплуатируется на железной дороге переменного тока напряжением 25 кВ частотой 50 Гц. Для реализации данной технологии необходима разработка и изгото-

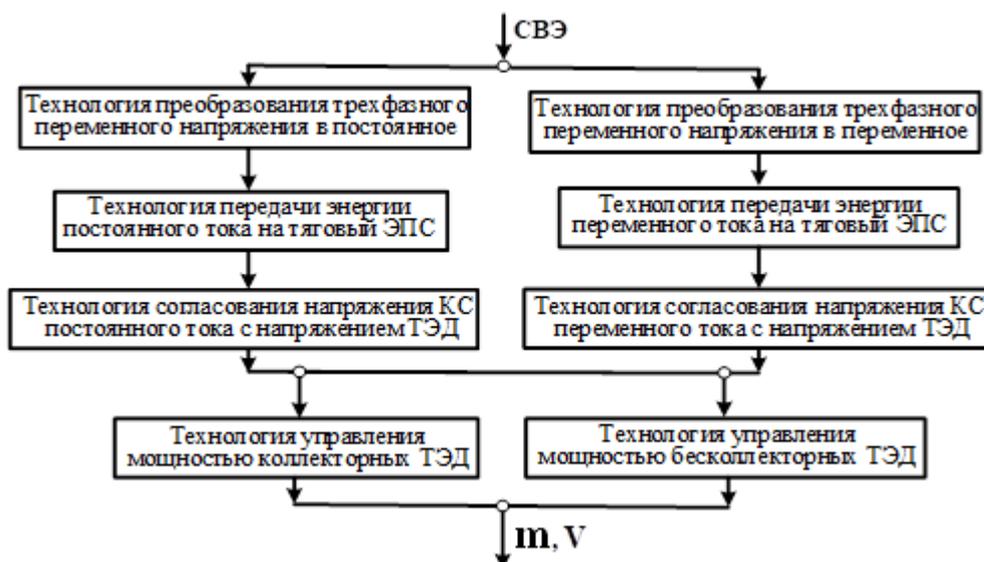


Рис. 3. Технологии электрической тяги поездов в России

Fig. 3. Electric traction train technology in Russia

товление выпрямителя на тяговых подстанциях, входного преобразователя на ЭПС (рис. 4) и проверка, при необходимости усиление диэлектрической прочности изоляции контактной подвески. Входной преобразователь высокого напряжения на ЭПС целесообразно разрабатывать и изготавливать для обеспечения технологии согласования постоянного напряжения контактной сети с напряжением коллекторных ТЭД постоянного тока. При применении тяговых трехфазных асинхронных двигателей на ЭПС необходимо обеспечивать технологию согласования постоянного напряжения контактной сети с напряжением в звене постоянного тока на входе трехфазных автономных инверторов напряжения (АИН).

С разработкой в Иркутском государственном университете путей сообщения (ИрГУПС) способа и устройства преобразования трехфазного напряжения в постоянное [18] на тяговых преобразовательных подстанциях (ТПП) можно применять трансформаторы общего назначения T_1, T_2 (рис. 4). Трехфазные трансформаторы силовые масляные предназначены для работы в электрических сетях наружных установок и изготавливаются предприятием ООО «Тольяттинский трансформатор» ТДТН-40 000/220-У1 [20]. Номинальное напряжение первичной обмотки 230 кВ, обмотки среднего напряжения 38,5 кВ и обмотки низкого напряжения 11 кВ. Потери холостого хода 54 кВт, потери короткого замыкания 220 кВт. Трансформатор выполнен с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН) на стороне высокого напряжения в диапазоне $\pm 12 \times 1 \%$,

с регулированием напряжения без возбуждения (ПБВ) на стороне среднего напряжения в диапазоне $2 \times 2,5 \%$ и оснащен системой принудительного воздушного охлаждения.

Для тягового трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором НТА-1200 [21, 22], с линейным номинальным напряжением на обмотках статора 2 183 В в номинальном режиме на вход АИН нужно прикладывать постоянное напряжение $U_d \geq 2 950$ В. В процессе регулирования мощности НТА для успешной реализации закона частотного управления широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) входным преобразователем высокого напряжения нужно постоянное напряжение U_d изменять с учетом частоты напряжения на обмотках статора НТА и отклонения напряжения на токоприемнике ЭПС. Для этого в системе управления ШИМ необходимо предусматривать обратную связь по напряжению на входе АИН и обратную связь по частоте трехфазного напряжения на выходе АИН.

Минимальные потери активной мощности при выполнении работы электрической энергией в ЛЭП, РЭС системы электроснабжения и в каждой технологической операции (см. рис. 3) достигаются выбором направления работ по совершенствованию оборудования на ТПП и входного преобразователя высокого напряжения на ЭПС. Целевыми функциями для технических решений являются:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{U^2 - U_p^2}} \rightarrow \min, I^2 \cdot R_L = \Delta P \rightarrow \min, \quad (10)$$

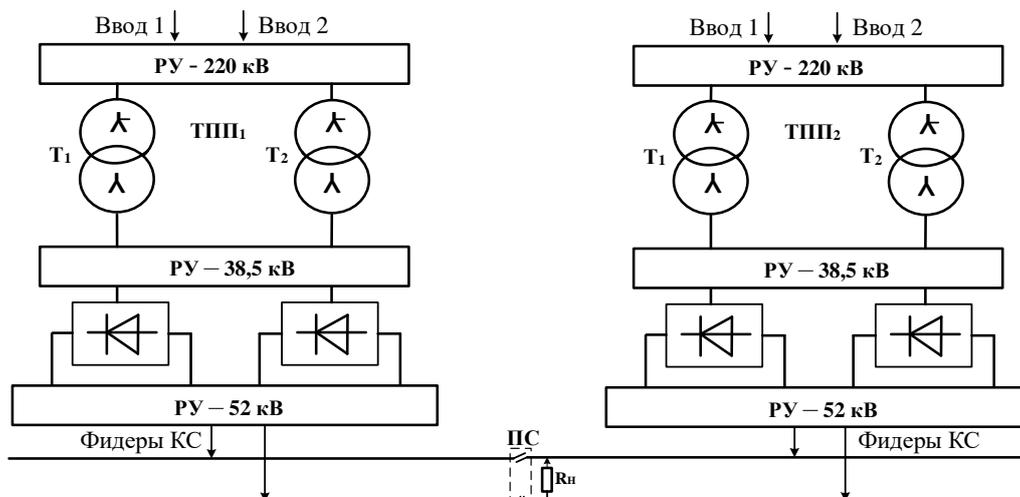


Рис. 4. Структурная схема энергетического обеспечения тяги поездов

Fig. 4. The structural diagram of the energy supply for train traction

если $U \rightarrow \max$, $U_p \rightarrow 0$; R_d – активное сопротивление линии системы электроснабжения, контактной сети, тягового трансформатора ТПП, силового оборудования входного преобразователя ЭПС и АИН.

Разработанными способами и устройством преобразования трехфазного напряжения в постоянное и оборудованием входного преобразователя высокого напряжения на ЭПС реализованы целевые функции (10) регулированием мощности устройств за счет изменения величины входного электрического сопротивления и поддержанием активного характера на всем диапазоне регулирования мощности вместо регулирования тока I изменением U_p . Предложенными техническими решениями устранена работа трансформаторов системы электрической тяги в режимах короткого замыкания.

Расчеты и оценки энергетических, электромагнитных процессов в каждом силовом блоке и системе энергетического обеспечения в целом выполнены с помощью предложенных аналитических выражений (3)–(9) с применением компьютерного моделирования и спектрального анализа электрических величин. Расчеты энергетических и электромагнитных процессов выполнены с помощью компьютерной программы MatLab в среде Simulink [23, 24].

Имитационная модель тяги соединенного поезда суммарной массой 24 900 т тремя трехсекционными электровозами с асинхронными тяговыми двигателями (АТД), которые работают в середине межподстанционной зоны, и системы обеспечения движения (СОД) поездов постоянного тока напряжением 52 кВ (рис. 5) позволяет оценить энергетические и электро-

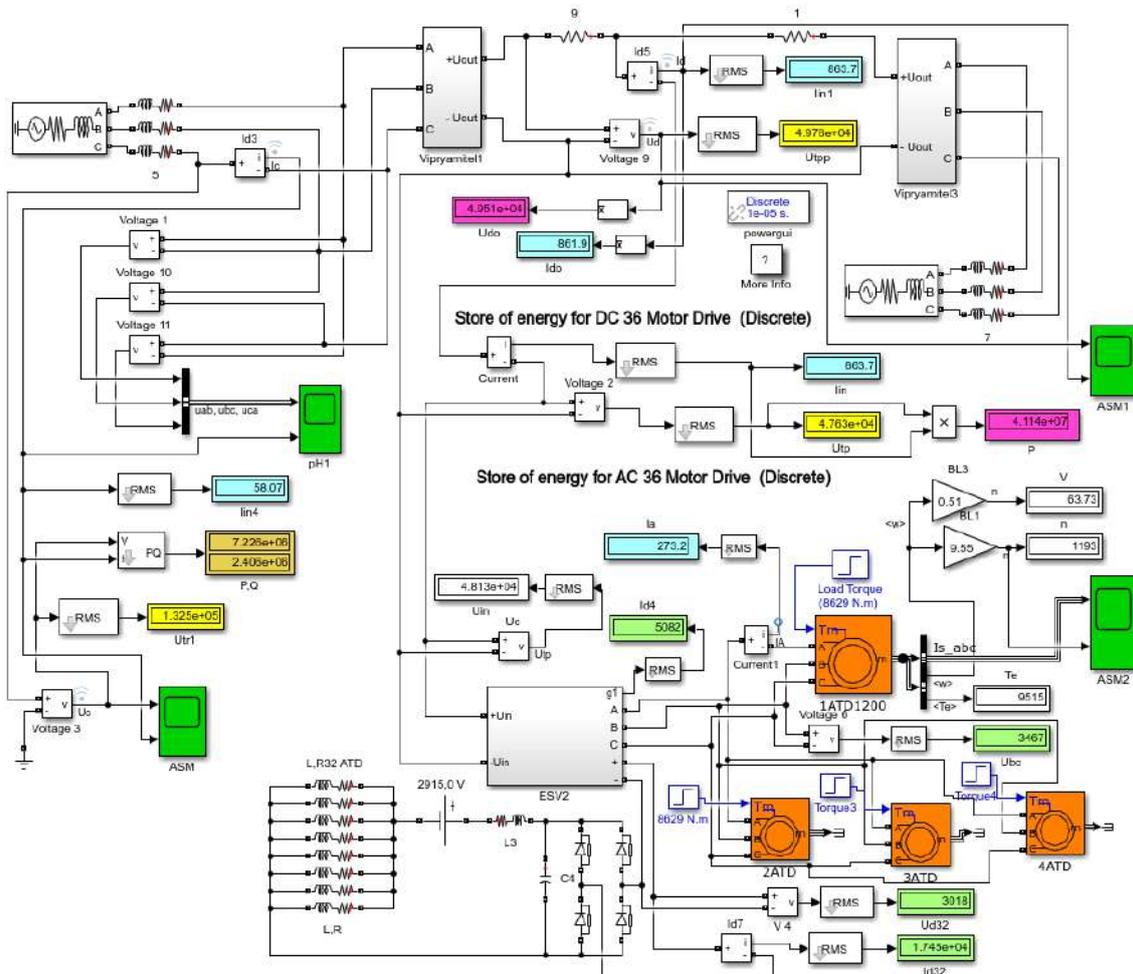


Рис. 5. Математическая модель системы обеспечения движения и электроподвижного состава постоянного тока напряжением 52 кВ с асинхронными тяговыми двигателями в установившемся режиме работы при $V = 63,7$ км/ч и массе соединенных поездов 24 900 т

Fig. 5. Mathematical model of traffic support system and 52 kV DC electric rolling stock with asynchronous traction motors in steady state operation at $V = 63,7$ km/h and a connected train mass of 24 900 t

магнитные свойства системы.

Суммарное входное электрическое сопротивление трех ЭПС с применением постоянного тока напряжением 52 кВ повысилось до $R_{BX52} = 2\,282$ Ом по сравнению с входным электрическим сопротивлением $R_{BX25} = 58$ Ом электрической тяги на переменном токе напряжением 25 кВ и частотой 50 Гц, поэтому величины токов в силовом оборудовании системы значительно снизились при увеличении массы поезда в 3,3 раза и повышении скорости движения на 32 %.

К обмоткам статора асинхронного трехфазного тягового двигателя НТА-1200 прикладывается трехфазное импульсное напряжение, а огибающая кривая тока в обмотках статора близка к синусоидальной кривой (рис. 6).

Результаты спектрального анализа (рис. 7) мгновенных значений фазного напряжения и

тока в первичной обмотке трансформаторов общего назначения на ТПП получены с помощью осциллографа ASM, блока powergui и применения программы быстрого преобразования Фурье FFT. Суммарный коэффициент гармонических составляющих фазного напряжения в трехфазной сети на входе системы энергетического обеспечения тяги соединенных поездов (THD) 0,98 %. Суммарный коэффициент гармонических составляющих фазного тока 14,48 %.

Суммарная активная мощность высших гармоник 150 Вт и составляет от активной мощности первой гармоники 0,2 %, что подтверждает высокую электромагнитную, энергетическую эффективность технических решений. Отрицательные знаки у активных мощностей высших гармоник свидетельствуют о том, что высшие гармоники сокращают процесс необра-

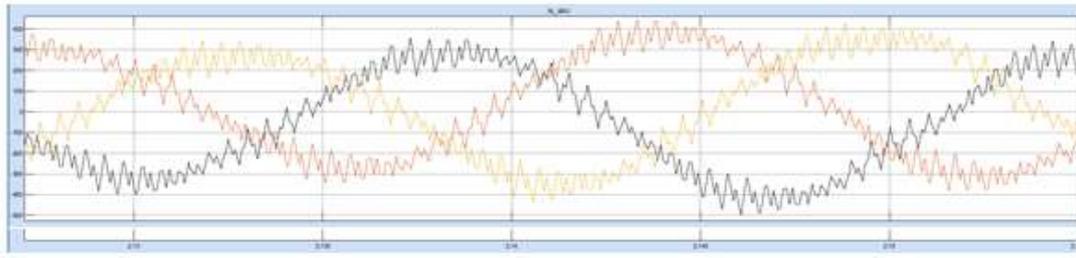


Рис. 6. Осциллограмма тока в обмотках статора НТА-1200

Fig. 6. Oscillogram of current in NTA-1200 stator windings

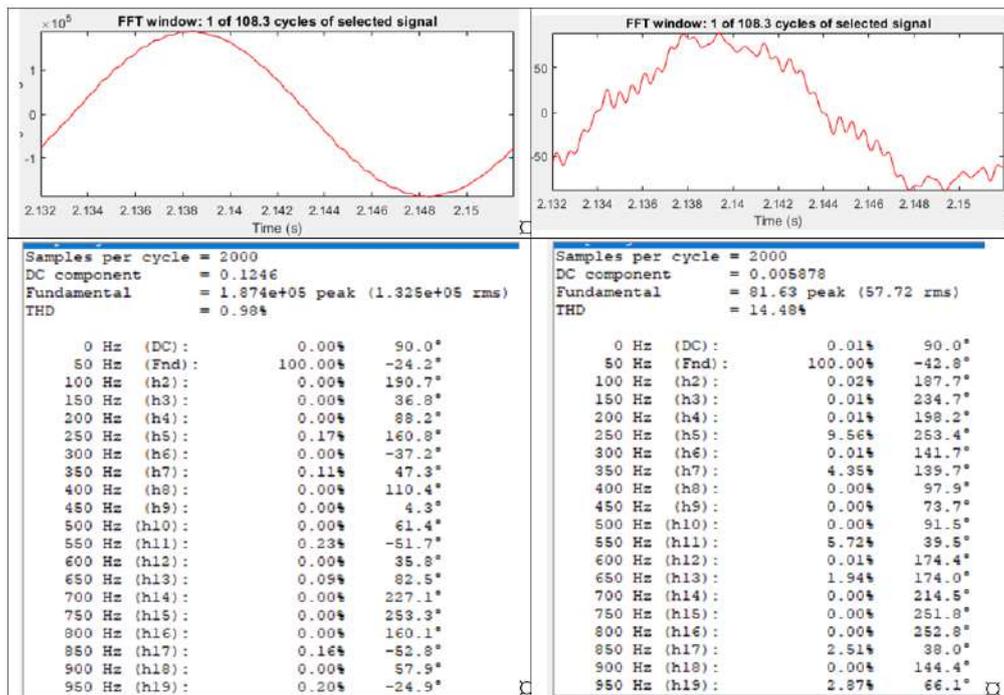


Рис. 7. Результаты спектрального анализа фазного напряжения и тока

Fig. 7. Results of spectral analysis of phase voltage and current

тимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии. Ток высших гармоник смещен по фазе относительно одноименных гармоник напряжения приблизительно на 90 эл. град., т.е. высшие гармоники практически формируют реактивную мощность, которая снижает интенсивность энергообмена в электрической цепи. Реактивная мощность первой гармоники тока

формируется в основном за счет мощности намагничивания тягового трансформатора ТПП, поэтому результаты расчета можно использовать для определения мощности конденсаторных батарей КРМ. Погрешность измерителя активной, реактивной мощности (см. рис. 5) и результатов спектрального анализа (табл. 1) не превышает 1,2 %.

Таблица 1. Гармонические составляющие фазного напряжения и тока

Table 1. Harmonic components of phase voltages and currents

Гармоника Harmonic	1	5	7	11	13	17	19	$\Sigma P_{\Phi}, \Sigma Q_{\Phi}$
$U_{\Phi}, \text{В}$	132 500	225,2	145,7	304,7	119,2	212,0	265,0	–
$I_{\Phi}, \text{А}$	57,72	5,52	2,51	3,30	1,12	1,45	1,66	–
$\varphi_k, \text{эл. град.}$	18,6	–92,6	–92,4	–91,2	–91,5	–90,8	–91,0	–
$P_{\Phi k}, \text{кВт}$	7 248,44	–0,0564	–0,0153	–0,021	–0,0035	–0,0429	–0,0115	7 248,29
$Q_{\Phi k}, \text{кВ} \cdot \text{Ар}$	2 439,37	–1,242	–0,365	–1,005	–0,133	–0,307	–0,4398	2 435,88

Таблица 2. Сравнительные показатели систем обеспечения движения поездов

Table 2. Comparative indicators of train support systems

№	Параметры системы обеспечения движения Propulsion system parameters	Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2	Вариант 3 Option 3
1	Полная мощность на входе ТПП1, ТПП2, МВА Total power at the input TPP1, TPP2, MVA	35,07	35,77	46,17
2	Активная мощность на входе ТПП1, ТПП2, МВт Active power at the input of TPP1, TPP2, MW	34,41	32,90	43,36
3	Коэффициент мощности электрической тяги Electric traction power factor	0,98	0,92	0,94
4	Коэффициент полезного действия выпрямительного агрегата, % Efficiency of the rectifier unit, %	99,2	99,0	99,2
5	Напряжение на выходе выпрямительного агрегата, кВ Voltage at the output of the rectifier unit, kV	41,47	34,89	49,78
6	Ток в токоприемнике электроподвижного состава, А Current in the current collector of the electric rolling stock, A	816,0	947,5	863,7
7	Потери активной мощности в контактной сети, МВт Active power losses in the contact network, MW	1,665	2,157	1,86
8	Коэффициент полезного действия контактной сети, % Contact network efficiency, %	95,1	93,3	95,7
9	Суммарный ток в обмотке якоря 36 ТЭД НБ-514Б, кА Total current in the armature winding 36 TED NB-514B, kA	29,24	29,14	–
10	Суммарный ток на входе 36 АИН, кА; Total input current 36 AI, kA	–	–	14,5
11	Коэффициент полезного действия входного преобразователя (ESV) ЭПС, % Input Converter Efficiency (ESV) EPS, %	90,10	96,27	98,5
12	Скорость движения поезда, км/ч; Train speed, km/h	50	50	63,7 (32,5 %)
13	Масса трех соединенных поездов с трехсекционными ЭПС, т Mass of three connected trains with three-section EPS, t	22 500	22 500	24 900
14	Суммарная мощность на валу 36 ТЭД Рв, МВт Total power on the shaft 36 TED RV, MW	27,6	27,6	38,81
15	Коэффициент полезного действия ТЭД НБ-514Б, НТА-1200, % Efficiency of TED NB-514B, NTA-1200, %	94,35	94,35	95,7
16	Коэффициент полезного действия электрической тяги поезда $\eta_{\text{ЭТ}} = (P_{\text{В}} / P) \cdot 100 \%$; Train electric traction efficiency $\eta_{\text{ЭТ}} = (P_{\text{В}} / P) \cdot 100\%$	80,2	83,9	89,5
17	Суммарный коэффициент гармонических составляющих u_{Φ} , % Total coefficient of harmonic components u_{Φ} , %	0,71	0,60	0,98
18	Суммарный коэффициент гармонических составляющих i_{Φ} , % Total coefficient of harmonic components i_{Φ} , %	16,16	24,95	14,48

Конструкция входного преобразователя ЭПС (см. рис. 5) обладает свойством электрического полупроводникового вариатора (ESV1), который преобразует для работы АТД постоянное напряжение 47,63 кВ и ток 863,7 А в контактной сети в постоянное напряжение 2 950 В и суммарный постоянный ток 14,5 кА на входе АИН. Постоянное напряжение 3 018 В и постоянный ток 14,5 кА на входе АИН преобразуются инверторами в трехфазное линейное напряжение 2 183 В частотой 60 Гц и линейный ток 273,2 А в обмотках статора каждого НТА-1200 из 36 электродвигателей.

В табл. 2 даны сравнительные показатели тяговых систем обеспечения движения поездов постоянного тока с напряжением в контактной подвеске 37,1 кВ и 52 кВ.

В варианте 1 даны показатели ранее исследованной СОД с трехфазным преобразовательным трансформатором мощностью 40 МВА, с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединена по схеме «звезда», другая – по схеме «треугольник» с напряжением 27,5 кВ. К обмоткам присоединен трехфазный двенадцатипульсовой мостовой выпрямитель последовательного типа. В середине межподстанционной зоны пункт секционирования (ПС) и выполняется тяга трех соединенных поездов трехсекционными ЭПС с коллекторными двигателями НБ-514Б.

В варианте 2 даны показатели ранее исследованной СОД с трехфазными двухобмоточными трансформаторами ТДТНЖ-40000-220-81 [25], которые применяются для тяги поездов на переменном токе напряжением 25 кВ, частотой 50 Гц. К вторичным обмоткам с напряжением 27,5 кВ присоединен трехфазный выпрямитель конструкции ИрГУПС. Три соединенных поезда с трехсекционными ЭПС и НБ-514Б, такие же, как в варианте 1, работают в середине межподстанционной зоны.

В варианте 3 даны показатели СОД, полученные с применением оборудования, подробно рассмотренного в данной работе с напряжением в контактной сети 52 кВ. Во всех вариантах СОД применяются одинаковые токоведущие части контактной подвески и номинальная нагрузка на валу ТЭД типа НТА-1200.

Резервы в загрузке токоведущих частей контактной подвески (см. табл. 2) и технические параметры НТА-1200 в продолжительном режиме работы [21, 22] позволяют реализовать

тягу трех соединенных поездов суммарной массой 24 900 т трехсекционными электровазми со скоростью 70 км/ч. С увеличением площади поперечного сечения проводов контактной подвески можно выполнять тягу двух соединенных поездов суммарной массой 16 600 т трехсекционными электровазми со скоростью 143 км/ч при повышении частоты напряжения на обмотках статора до 135 Гц.

Заключение

Разработанной в ИрГУПС теорией электромагнитных, энергетических процессов в электрических цепях с полупроводниковыми регуляторами напряжения аналитически доказано, что причиной снижения энергетической эффективности и генерирования электромагнитных помех является сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии. К признакам, последствиям данного физического явления относятся: сдвиг по фазе кривой мгновенных значений тока относительно напряжения и нелинейные искажения формы кривой тока, напряжения. Вместо регуляторов напряжения предложено изменять мощность электрической тяги за счет изменения входного электрического сопротивления ПРМ с нагрузкой.

КПД электрической тяги поездов в варианте 3 повышается на 15,3 % с увеличением суммарной массы поездов в 3,3 раза и скорости движения на 32,5 % по сравнению с тягой на переменном токе напряжением 25 кВ и частотой 50 Гц за счет применения постоянного тока напряжением 52 кВ в контактной сети и асинхронных ТЭД. При снижении суммарной массы трех соединенных поездов с трехсекционными электровазми и применении НТА-1200 вместо коллекторных ТЭД с повышением частоты напряжения на обмотках статора АТД до $f_{max} = 135$ Гц можно повышать скорость движения грузовых поездов до 143 км/ч (на 69 %) по сравнению с тягой ЭПС, оснащенными коллекторными машинами. Снижением величины тока в контурах системы электрической тяги за счет повышения напряжения, устранения коротких замыканий во время коммутации тока СПП ПРМ обеспечивается значительное повышение производительности транспортных работ, энергосбережение без применения компенсаторов реактивной мощности и фильтров.

Список литературы

1. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1884. № 175. P. 343–361. DOI 10.1098/rstl.1884.0016.
2. Умов Н.А. Избранные сочинения. М.–Л. : Гостехиздат, 1950. 575 с.
3. Кабанов И.Д., Горбунов А.Н., Редько И.Я. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Челябинск: ЧГАУ, 1996. 380 с.
4. Кабанов И. Д., Горбунов А. Н., Редько И.Я. Теоретические основы электротехники. Ч. 2. Челябинск: ЧГАУ, 1996. 229 с.
5. Маевский О.А. Энергетические характеристики вентильных преобразователей. М. : Энергия, 1978. 320 с.
6. Francesco V., Luigi I. Dynamic and Control of Switched Electronic Systems // *Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters*. London : Springer, 2012. 492 p.
7. Розанов Ю.К., Бурман А.П., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. М. : МЭИ, 2012. 336 с.
8. Multivariable Deadbeat Control of Power Electronics Converter with Fast Dynamic Response and Fixed Switching Frequency / J. Rothen, D. Dewar, P. Zanchetta et al. // *Energies*. 2021. Vol. 14 (2), Is. 313. DOI 10.3390/en14020313.
9. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. Т. 2. 307 с.
10. Deadbeat Control for a Single-Inductor Multiple-Input Multiple-Output DC–DC Converter / B. Wang, X. Zhang, J. Ye et al. // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018, Vol. 34, Is. 2. P. 1914–1924.
11. Алексеева Т.Л. Анализ закономерностей регулирования мощности в электроэнергетической системе. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. 208 с.
12. Рябченко Н.Л. Повышение энергетической эффективности регуляторов мощности электроподвижного состава. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. 196 с.
13. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. СПб. : Питер, 2009. Т. 2. 431 с.
14. Афанасьев Б.П., Гольдин О.Е., Кляцкин И.Г. Теория линейных электрических цепей. М. : Высш. шк., 1973. 592 с.
15. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М. : Высш. шк., 1996. 638 с.
16. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи. М. : Энергия, 1970. 592 с.
17. Инновационные перспективы тягового электроподвижного состава / А.В. Воротилкин, Н.Л. Михальчук, Н.Л. Рябченко и др. // *Мир транспорта*. 2015. Т. 13. № 6. С. 62–76.
18. Пат. 2784926 Рос. Федерация. Способ распределения, суммирования и регулирования мощности потоков электрической энергии при преобразовании трехфазного напряжения в постоянное / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев и др. № 2021113473 ; заявл. 11.05.2021 ; опубли. 01.12.2022, Бюл. № 34. 7 с.
19. Энергетическая эффективность тягового привода магистральных электровозов / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, А.Л. Астраханцев и др. // *Изв. Транссиба*. 2020. № 1 (41). С. 29–41.
20. Трансформаторное оборудование : каталог // Тольяттинский трансформатор : сайт. URL : <https://www.transformator.com.ru/ttproduction/transform/> (Дата обращения 10.02.2023).
21. Каталог тяговых электродвигателей ОАО НПО «Новочеркасский электровозостроительный завод» // Региональный Центр Инновационных Технологий : сайт. URL: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html> (Дата обращения 10.02.2023).
22. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов / Ю.А. Бахвалов, Г.А. Бузало, А.А. Зарифьян и др. М. : Маршрут, 2006. 374 с.
23. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб. : КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
24. Компьютерное моделирование электромеханических систем постоянного и переменного тока в среде Matlab Simulink / Ю.Н. Дементьев, В.Б. Терехин, И.Б. Однокопылов и др. Томск : ТПУ, 2018. 497 с.
25. Трансформаторы и автотрансформаторы напряжением 10-220 кв для электрифицированных железных дорог на переменном токе : каталог // Энерготранс : сайт. URL: http://www.tmg66.ru/catalog/?il_cdid=104 (Дата обращения: 10.02.2023).

References

1. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1884, no. 175, pp 343–361. doi.org/10.1098/rstl.1884.0016.
2. Umov N.A. *Izbrannye sochineniya* [Selected writings]. Moscow – Leningrad: Gostekhizdat Publ., 1950. 571 p.
3. Kabanov I.D., Gorbunov A.N, Red'ko I.Ya. *Teoreticheskie Osnovy Elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Chelyabinsk: ChGAU Publ., 1996, vol. 1, 380 p.
4. Kabanov I.D., Gorbunov A.N, Red'ko I.Ya. *Teoreticheskie Osnovy Elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Chelyabinsk: ChGAU Publ., 1996, vol. 2, 229 p.
5. Maevskii O.A. *Energeticheskie kharakteristiki ventil'nykh preobrazovatelei* [Energy Characteristics of Valve Converters]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 320 p.
6. Francesco V., Luigi I. Dynamic and Control of Switched Electronic Systems. *Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters*. London : Springer, 2012. 492 p.
7. Rozanov Yu.K., Burman A.P., Shakaryan Yu.G. *Upravlenie potokami elektroenergii i povyshenie effektivnosti elektroenergeticheskikh sistem* [Managing electricity flows and improving the efficiency of electric power systems]. Moscow: MEI Publ., 2012. 336 p.
8. Rohten J., Dewar D., Zanchetta P., Formentini A., Munoz J.A., Baier C.R., Silva J. Multivariable Deadbeat Control of Power Electronics Converter with Fast Dynamic Response and Fixed Switching Frequency. *Energies*. 2021, vol. 14 (2), issue 313. DOI:10.3390/en14020313.
9. Burkov A.T. *Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika* [Electronics and Converter Technology]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2015, vol. 2, 307 p.

10. Wang B., Zhang X., Ye J., Gooi H.B. Deadbeat Control for a Single-Inductor Multiple-Input Multiple-Output DC–DC Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 34, issue 2, pp. 1914–1924.
11. Alekseeva T.L. Analiz zakonomernosti regulirovaniya moshchnosti v elektroenergeticheskoi sisteme [Analysis of regularities of power regulation in the electric power system]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. 208 p.
12. Ryabchenok N.L. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti regulyatorov moshchnosti elektropodvizhnogo sostava [Improving the energy efficiency of electric rolling stock power regulators]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. 196 p.
13. Demirchan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical Bases of an Electrical Engineering]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2009, vol. 2, 431 p.
14. Afanas'ev B.P., Gol'din O.E., Klyatskin I.G. Teoriya lineinykh elektricheskikh tsepei [Linear Electrical Circuit Theory]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1973. 592 p.
15. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1996. 638 p.
16. Atabekov G.I. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki (v 3 ch.). Ch. 1. Lineinye elektricheskie tsepi [Theoretical foundations of electrical engineering (in 3 parts). Part 1. Linear electrical circuits]. Moscow: Energiya Publ., 1970. 592 p.
17. Vorotilkin A.V., Miha'chuk N.L., Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L. Innovatsionnye perspektivy tyagovogo elektropodvizhnogo sostava [Innovative perspectives of traction electric rolling stock]. *Mir transporta* [World of transport], 2015, vol. 13, no. 6, pp. 62–76.
18. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Nemykina V.V. Patent RU 2784926 C2, 01.12.2022.
19. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' tyagovogo privoda magistral'nykh elektrovozov [Energy efficiency of mainline electric locomotive traction drive]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2020, no. 1 (41), pp. 29–41.
20. Transformatornoe oborudovanie: katalog (Elektronnyi resurs) [Transformer equipment: catalog (Electronic resource)]. Available at: <https://www.transformator.com.ru/tproduction/transform/> (Accessed February 10, 2023).
21. Katalog tyagovykh elektrovigatelei OAO NPO «Novocherkasskii elektrovozostroitel'nyi zavod» (Elektronnyi resurs) [Traction motors catalogue of NovoCherkassk Electric Locomotive Plant (Electronic resource)]. Available at: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html> (Accessed February 10, 2023).
22. Bakhvalov Yu.A., Buzalo G.A., Zarif'yan A.A., Petrov P.Yu. Dinamicheskie protsessy v asinkhronnom tyagovom privode magistral'nykh elektrovozov [Dynamic processes in asynchronous traction drive of mainline electric locomotives]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 374 p.
23. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK [Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC]. Saint Petersburg: KORONA-Vek Publ., 2008. 368 p.
24. Dement'ev Yu.N., Terekhin V.B., Odnokopylov I.B., Rulevskii V.M. Komp'yuternoe modelirovanie elektromekhanicheskikh sistem postoyannogo i peremennogo toka v srede Matlab Simulink [Computer simulation of electromechanical dc and ac systems in Matlab Simulink environment]. Tomsk: TPU Publ., 2018. 497 p.
25. Transformatory i avtotransformatory napryazheniem 10–220 kv dlya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog na peremennom toke: katalog (Elektronnyi resurs) [Transformers and autotransformers with a voltage of 10–220 kV for electrified railways on alternating current: catalog (Electronic resource)]. Available at: http://www.tmg66.ru/catalog/?il_cdid=104 (Accessed February 10, 2023).

Информация об авторах

Рябченко Наталья Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astranal@mail.ru.

Алексева Татьяна Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: talecseeva843@gmail.com.

Астраханцев Леонид Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: astrahancev1943@mail.ru.

Тихомиров Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: svat_irk@mail.ru.

Зарубин Андрей Денисович, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: andrej.denisovich.90@mail.ru.

Information about the authors

Natalya L. Ryabchenok, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: astranal@mail.ru.

Tatyana L. Alekseeva, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: talecseeva843@gmail.com.

Leonid A. Astrakhantsev, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: astrahancev1943@mail.ru.

Vladimir A. Tikhomirov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: svat_irk@mail.ru.

Andrei D. Zarubin, Ph.D. student of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: andrej.denisovich.90@mail.ru.

Моделирование процессов билетно-кассового обслуживания посетителей вокзального комплекса

И.А. Чубарова✉, А.Д. Доможирова

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

✉ia7chubarova@gmail.com

Резюме

Для эффективного использования и дальнейшего развития вокзальных комплексов ОАО «РЖД» была принята и утверждена Стратегия развития холдинга на период до 2030 года. На ее основе сейчас осуществляется работа по модернизации вокзалов на железнодорожном транспорте: внедрение современных технологий, переустройство пассажирских устройств, увеличение услуг, которые предоставляются на вокзале посетителям, изменение основных устройств вокзалов, автоматизация процессов производства. Одновременно идет поиск направлений для более эффективного использования объектов вокзальных комплексов, в том числе с помощью методов имитационного моделирования. Целью настоящего исследования является изучение возможностей программного обеспечения AnyLogic для имитационного моделирования процессов работы вокзального комплекса. Задачи исследования заключаются в анализе пассажиропотоков и имитационном моделировании билетно-кассового обслуживания. Объектом изучения выступает вокзальный комплекс Иркутск-Пассажирский. В работе показано моделирование процессов, происходящих на вокзальном комплексе (на примере отдельной железнодорожной станции), и рассмотрены варианты совершенствования качества обслуживания посетителей. В статье обоснован выбор метода имитационного моделирования и проведен анализ текущей системы путем построения имитационных моделей. Представлены результаты двух сценариев имитационного моделирования работы билетных касс. Разработка имитационной модели билетно-кассового обслуживания позволила определить «узкие» места и скорректировать режим работы билетных касс для рациональной организации обслуживания посетителей вокзального комплекса. Внедрение программного обеспечения AnyLogic даст возможность получать детальное представление о процессах, происходящих на вокзальном комплексе, находить недостатки в его функционировании и оптимизировать необходимые операции.

Ключевые слова

вокзальный комплекс, программное обеспечение AnyLogic, имитационная модель, моделирование, билетно-кассовое обслуживание, организация пассажиропотока, посетители, пассажиры, улучшение качества обслуживания

Для цитирования

Чубарова И.А. Моделирование процессов билетно-кассового обслуживания посетителей вокзального комплекса / И.А. Чубарова, А.Д. Доможирова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 156–168. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).156-168.

Информация о статье

поступила в редакцию: 20.01.2023; поступила после рецензирования: 22.03.2023 г.; принята к публикации: 23.03.23 г.

Simulation of the processes of ticket and cash service for visitors of the station complex

I.A. Chubarova✉, A.D. Domozhirova

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ia7chubarova@gmail.com

Abstract

For the effective use and further development of the station complexes of JSC Russian Railways, the Concept until 2030 was adopted and approved. On the basis of the adopted concept, work is now underway to modernize railway stations: the introduction of modern technologies, the reconstruction of passenger facilities, the increase in services provided to visitors at the station, the change in the main station devices, and the automation of production processes. At the same time, there is a search for directions for more efficient use of the station complex facilities, including with the help of simulation modeling methods. The purpose of this research is to study the capabilities of the AnyLogic software for simulating the processes of the station complex. The objectives of the study are to analyze passenger flows and simulate the ticketing service. The subject of the research is the station complex Irkutsk-Passenger. The paper shows the modeling of processes occurring at the station complex (on the example of the Irkutsk-Passenger railway station) and considers options for improving the quality of service for visitors to the station complex. In the study, the choice of the simulation method was substantiated and the analysis of the current system was carried out by building simulation models. The article presents the results of two scenarios for simulating the work of ticket offices. The

development of a simulation model of ticketing and cash services made it possible to identify «bottlenecks» and adjust the operating mode of ticket offices for the rational organization of servicing the station complex visitors. Implementation of AnyLogic software will make it possible to obtain a detailed understanding of the processes taking place at the station complex, to find «bottlenecks» and optimize processes in need.

Keywords

station complex, AnyLogic software, simulation model, modeling, ticketing and cash services, organization of passenger traffic, visitors, passengers, improving the quality of service

For citation

Chubarova I.A., Domozhirova A.D. Modelirovanie protsessov biletno-kassovogo obsluzhivaniya posetitelei vokzal'nogo kompleksa [Modeling the processes of ticketing and cash services for visitors to the station complex]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 156–168. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).156-168.

Article Info

Received: January 20, 2023; Revised: March 22, 2023; Accepted: March 23, 2023.

Введение

Во все времена людям для учебы, путешествий, отдыха и работы необходимо было перемещаться. Транспорт всегда занимал и будет занимать значимые позиции в каждой стране. Изменения в политической жизни нашего государства не могут сегодня не сказаться на выборе вектора дальнейшего функционирования транспортной системы, в том числе в области железнодорожных пассажирских перевозок. В настоящее время во главу угла поставлена задача развития внутренних путей сообщения для перевозок пассажиров [1]. В связи с этим на железнодорожную отрасль возложена серьезная ответственность по обеспечению безопасности, доступности и комфорта пассажирских перевозок [2]. Очевидно, что применение ИТ-технологий, в том числе имитационного моделирования, при возрастающем объеме перевозок пассажиров по железной дороге должно стать неотъемлемой частью повышения уровня развития как самой отрасли, так и государства в целом.

Моделирование на объектах инфраструктуры применяется, если эксперимент в реальности затруднен по причине высоких материальных или временных затрат. Кроме того, разработка моделей позволяет увидеть эффективность предложенных мероприятий без рисков для функционирования объекта и детально отследить поведение системы во времени [3].

Анализ существующих на рынке систем бизнес-моделирования позволил сделать вывод, что программная среда российского производства AnyLogic дает возможность создавать комплексные решения для планирования, организации и оптимизации пешеходных потоков в обществен-

ных зданиях, в том числе на вокзалах [4].

Целью настоящего исследования является изучение возможностей программного обеспечения AnyLogic для имитационного моделирования процессов работы вокзального комплекса. Задачами исследования являются оптимизация бизнес-процессов и нахождение «узких» мест в пунктах обслуживания пассажиров.

Объектом изучения выступает вокзальный комплекс Иркутск-Пассажирский. Разработка моделей в системе AnyLogic позволит рассмотреть такой бизнес-процесс, как организация билетно-кассового обслуживания, с целью оптимизации числа и работы билетных касс для обеспечения запросов посетителей в режиме реального времени.

Характеристика и анализ работы вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский

Железнодорожный вокзал Иркутск-Пассажирский является крупнейшим пассажирским вокзалом на Восточно-Сибирской магистрали. На вокзальном комплексе имеется пассажирское здание, пешеходный тоннель, перрон, платформы для посадки пассажиров, переходы в разных уровнях через железнодорожные пути, малые архитектурные формы, привокзальная территория [5].

В настоящее время ведется реконструкция здания вокзала. Новый корпус иркутского вокзала с объединенным пассажирским залом сделает пребывание на вокзальном комплексе более комфортным и удобным, повысив привлекательность города и региона, в том числе с точки зрения туризма [6].

На вокзальном комплексе Иркутск-Пассажирский пассажирам и посетителям ока-

зываются обязательные услуги, в том числе билетно-кассовое обслуживание, целью которых является оформление, переоформление документов для проезда или их возврат [7]. Проездные документы оформляются в билетных кассах дальнего следования АО «ФПК» и билет-

ных кассах пригородного сообщения АО «БППК». Эта деятельность осуществляется в круглосуточном режиме и зависит от пассажиропотока. Распределение потока пассажиров по часам суток на вокзале Иркутск-Пассажирский представлено в табл. 1.

Таблица 1. Почасовой анализ пассажиропотока вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский
Table 1. Hourly analysis of the passenger traffic of the station complex Irkutsk-Passenger

Время, час Time, hour	№ поезда Train number	Число пассажиров Number of passengers		Посетители, чел. Visitors, people	Итого, чел. Total, people
		Прибывающих, пасс. arriving, pass.	Отправляющихся, пасс. departing, pass		
1	2	3	4	5	6
00:00–01:00	82	116	109	234	659
	6 301	–	200		
01:00–02:00	6 301	–	236	256	853
	62	–	36		
	6 303	–	63		
	6 302	–	173		
	6 333	–	39		
02:00–03:00	62	109	121	316	1976
	6 303	33	216		
	6 302	213	217		
	6 333	253	56		
	8	–	116		
	6 305	–	21		
	361	207	–		
70	–	98			
03:00–04:00	8	121	129	293	1255
	6 305	112	103		
	70	105	108		
	6 112	203	–		
	6 306	–	52		
	6 335	–	29		
04:00–05:00	6 306	26	115	248	891
	6 335	143	59		
	921	136	–		
	6 307	–	11		
	6 308	153	–		
05:00–06:00	6 307	109	33	293	580
	269	39	40		
	6 314	–	66		
06:00–07:00	269	–	203	102	753
	6 314	129	109		
	87	210	–		
07:00–08:00	6 102	–	29	136	243
	6 320	–	78		
08:00–09:00	6 102	139	29	120	589
	6 320	35	112		
	250	–	81		
	6 103	–	7		
09:00–10:00	250	–	116	136	754
	6 103	29	223		
	7 102	105	–		

Окончание таблицы 1
End of table 3

1	2	3	4	5	6
	6 313	59	63		
	61	–	23		
10:00–11:00	6 313	79	87	105	729
	61	101	123		
	69	97	121		
	6 117	–	16		
11:00–12:00	6 117	23	103	119	337
	6 334	–	36		
	6 319	–	56		
12:00–13:00	6 334	20	97	129	444
	6 319	17	93		
	6 108	–	9		
	7 101	–	79		
13:00–14:00	6 108	103	19	178	620
	7 101	–	116		
	249	116	–		
	6 326	–	16		
	6 324	–	72		
14:00–15:00	6 326	99	21	188	675
	6 324	19	103		
	6 323	–	10		
	6 325	–	52		
	362	–	131		
	6 328	–	52		
15:00–16:00	6 323	103	25	203	769
	6 325	23	107		
	6 328	107	123		
	2	–	73		
	6 329	–	5		
16:00–17:00	2	107	121	209	735
	6 329	112	17		
	6 114	–	11		
	57	–	105		
	7	–	53		
17:00–18:00	6 114	99	25	216	783
	57	–	203		
	7	119	121		
18:00–19:00	322	–	83	129	212
19:00–20:00	322	–	132	101	233
20:00–21:00	–	–	–	93	93
21:00–22:00	1	–	51	91	142
22:00–23:00	1	105	116	75	296
23:00–24:00	82	–	51	136	202
	6 301	–	15		

По результатам полученных данных (см. табл. 1) о почасовом распределении потока пассажиров было установлено, что наблюдается суточная неравномерность. Так, максимальное число пассажиров и посетителей вокзального комплекса приходится на утренний час

пик (с 2:00 до 3:00 по московскому времени) и составляет почти 2 000 пассажиров, минимальное значение (менее 100 пассажиров) выпадает на ночное время (с 20:00 до 21:00 по московскому времени).

На величину пассажиропотока влияет ко-

личество прибывающих и отправляющихся пассажирских и пригородных поездов. В рамках исследования был проведен анализ размеров движения по ст. Иркутск-Пассажи́рский.

Размеры движения пассажирских поездов и категории обслуживаемых на вокзальном комплексе пассажиров и посетителей представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Размеры движения пассажирских и пригородных поездов

Table 2. Passenger and commuter train traffic volumes

Категория поездов Train category	Летний период, пар поездов Summer period, steam trains	Зимний период, пар поездов Winter period, steam trains
Пассажирские и скорые поезда дальнего следования Passenger and fast long-distance trains	53	42
Пригородные поезда Commuter trains	32	36
Итого Total	85	78

Таблица 3. Категории и количество пассажиров и посетителей

Table 3. Categories and number of passengers and visitors

Категории пассажиров и посетителей Categories of passengers and visitors		Категория пассажирского поезда Category passenger train	Количество человек, сут. Number of people, days
Посетитель Visitor		–	2 422
Пассажир Passenger	Прибытия arrival	Дальнего следования Long-distance	565
		Пригородный (в том числе скорый пригородный) Commuter (including fast commuter)	610
	Отправления departures	Дальнего следования Long distance	652
		Пригородный (в том числе скорый пригородный) Commuter (including fast commuter)	595

На основе существующего расписания пассажирских и пригородных поездов и с учетом принятой технологии работы, в рамках исследования был разработан график работы вокзального комплекса ст. Иркутск-Пассажи́рский с целью определения заполняемости инфраструктуры вокзала в течение суток. Анализ загруженности устройств вокзального комплекса показал, что она достигает максимальных значений в периоды с 1:00 до 5:00 (по московскому времени), а минимальная загрузка приходится на период с 18:00 до 24:00 (по московскому времени). Минимум загрузки в данное время обусловлено тем, что по местному времени этот период приходится на ночь.

Для наиболее полного представления работы вокзального комплекса Иркутск-Пассажи́рский, в ходе исследования были про-

анализированы пассажиропотоки за период 2017–2021 гг. Среднесуточные, годовые и общие пассажиропотоки для пригородного и дальнего следования представлены в табл. 4.

Анализ потока пассажиров показал, что значение годового пассажиропотока дальнего следования в период с 2017 по 2019 г. увеличилось, затем заметно снижение в 2020 г. и небольшое повышение в 2021 г. Пассажиропоток дальнего сообщения в 2020 г. стал меньше на 50,14 %, чем годом ранее, а в 2021 г. произошло увеличение на 33 % в сопоставлении с предыдущим годом. Что касается пригородного сообщения, то здесь значение годового пассажиропотока в 2018 г. уменьшилось на 5 %, если сравнивать с 2017 г., а в 2019 г. увеличилось относительно 2018 г. на 5,2 %, затем снова наблюдается спад, и уже в 2021 г. поток сни-

зился на 28,5 %, если сравнивать с 2019 г. Также можно заметить уменьшение общего пасса-

жиропотока в 2020 и 2021 гг. относительно периода 2017–2019 гг.

Таблица 4. Пассажиропотоки вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский в 2017–2021 гг.

Table 4. Passenger flows of the station complex Irkutsk-Passenger in 2017–2021

Год Year	Дальнее сообщение Long distance service		Пригородное сообщение Commuter service		Общий годовой пассажиропоток, пасс. Total annual passenger traffic, pass
	Годовой пассажиропоток, пасс. Annual passenger traffic, pass.	Среднесуточный пассажиропоток, пасс. Average daily passenger traffic, pass	Годовой пассажиропоток, пасс. Annual passenger traffic, pass.	Среднесуточный пассажиропоток, пасс. Average daily passenger traffic, pass	
2017	748 720	2 057	595 926	1 637	1 344 646
2018	805 479	2 212	567 526	1 600	1 373 005
2019	835 529	2 289	597 307	1 636	1 432 836
2020	416 621	1 141	453 495	1 242	870 116
2021	555 319	1 521	427 172	1 170	982 491

Помимо разницы пассажиропотоков по годам, также можно заметить различия между значениями пассажиропотоков дальнего и пригородного сообщений. Существенную долю общего пассажиропотока занимает пассажиропоток дальнего следования, кроме 2020 г., где пригородный пассажиропоток превысил пассажиропоток дальнего следования. Для визуального анализа данные табл. 4. представлены в виде гистограммы на рис. 1.

Таким образом, анализ пассажиропотока позволил сделать вывод, что пассажиропоток дальнего следования значительно превышает пассажиропоток пригородного сообщения, что обусловлено неравномерностью пригородного пассажиропотока по дням недели и сезонностью пригородного сообщения [8].

Для исключения возможности дальней-

шего уменьшения пассажиропотоков и привлечения пассажиров необходимо принимать меры с целью повышения востребованности пассажирских перевозок в регионе. Возможными вариантами могут быть, в том числе, повышение комфорта и качества обслуживания пассажиров на вокзальном комплексе путем применения имитационного моделирования для обеспечения запросов посетителей в режиме реального времени [9].

Создание имитационной модели вокзального комплекса

Имитационное моделирование в программной среде AnyLogic включает в себя применение различных методов, в том числе дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование и системную динамику.

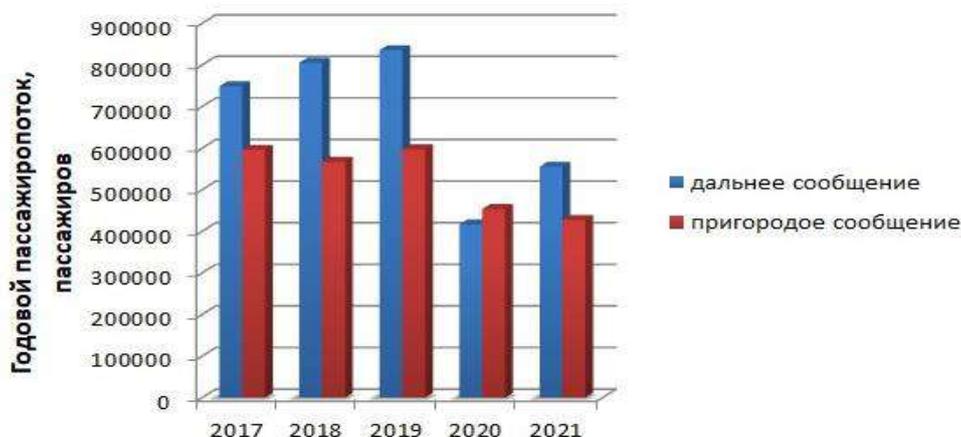


Рис. 1. Гистограмма годового пассажиропотока на период 2017–2021 гг.

Fig. 1. Histogram of annual passenger traffic for the period 2017–2021

Анализ существующих методов показал, что для вокзального комплекса приемлемым является первый из перечисленных подходов. Дискретно-событийное моделирование характеризуется таким функционированием системы, при котором события развиваются в хронологическом порядке. В конкретный момент времени происходит событие и демонстрирует, как изменилось состояние системы [10].

С применением рассмотренного метода в программной среде AnyLogic была разработана

имитационная модель организации билетно-кассового обслуживания вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский.

В модели в качестве агента выступает пассажир. Для более детального представления процессов использовались единицы времени – минуты, моделируемый отрезок – сутки [11]. Построенная модель состоит из 26 элементов.

Настройки модели билетно-кассового обслуживания вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский» представлены в табл. 5–8.

Таблица 5. Сведения для блока «Source»

Table 5. Information for the «Source» block

Расписание интенсивности прибытия пассажиров Passenger Arrival Rate Schedule		
Время (московское), час Time (Moscow), hour	Интенсивность прибытия пассажиров, пасс. / час Passenger arrival intensity, pass / hour	
	В пригородные кассы At suburban ticket offices	В кассы дальнего следования At the long-distance ticket offices
00:00–01:00	62	63
01:00–02:00	136	68
02:00–03:00	141	130
03:00–04:00	108	73
04:00–05:00	75	60
05:00–06:00	53	53
06:00–07:00	48	33
07:00–08:00	71	23
08:00–09:00	101	68
09:00–10:00	111	74
10:00–11:00	117	78
11:00–12:00	94	31
12:00–13:00	108	33
13:00–14:00	91	60
14:00–15:00	152	101
15:00–16:00	123	83
16:00–17:00	51	101
17:00–18:00	26	118
18:00–19:00	5	46
19:00–20:00	2	33
20:00–21:00	0	6
21:00–22:00	0	10
22:00–23:00	0	7
23:00–00:00	3	3

Таблица 6. Значения условий для блоков «SelectOutput»

Table 6. Condition values for «SelectOutput» blocks

Название блока Block name	Выбор выхода Output selectable	Значение условия Condition value
Выбор способа покупки Choice of purchase method	При выполнении условия	((БПА.size>2) (queue.size<1)) (покупка в кассе)
Выбор способа покупки Choice of method purchases	При выполнении условия	((очередь.size>0) (queue1.size<1)) (покупка в кассе)

Таблица 7. Сведения для боков «Queue»
Table 7. Details for the «Queue» sides

Название блока Block name	Вместимость, чел Capacity, people	Таймаут, мин. Timeout, min
Кассы пригородного следования Suburban ticket offices	80	25
Кассы дальнего следования Long-distance ticket offices	110	30
Транзакционный терминал самообслуживания Transactional self-service terminal	5	–

Таблица 8. Данные для блоков «Delay»
Table 8. Data for «Delay» blocks

Название блока Block name	Минимальное время, мин. Minimum time, min	Вероятное время, мин Probable time, min	Максимальное время, мин Maximum time, min	Вместимость, чел. Capacity, people
Покупка в кассе пригородной Purchase at the commuter box office	2	2,5	3	4
Билетопечатающий автомат ticket printing machine	1,5	2	2,5	4
Покупка в кассе дальней Purchase at the long distance box of- fice	3	4	6	11
Транзакционный терминал самообслуживания Transactional self-service terminal	1,5	2	2,5	1

Для существующего расписания работы пригородных касс и касс дальнего следования принято определенное количество работающих кассиров, число билетопечатающих автоматов и транзакционных терминалов самообслуживания. Имитационная модель организации билетно-кассового обслуживания вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский представлена на рис. 2.

Представленная имитационная модель (см. рис. 2) включает в себя блок «Выход без обслуживания», показывающий количество посетителей, не удовлетворенных качеством работы билетных касс. Для анализа результатов моделирования билетно-кассового обслуживания в системе AnyLogic были рассмотрены основные показатели, характеризующие работу касс. Соотношение числа обслуженных и не обслуженных пассажиров в кассах дальнего следования и в пригородных кассах представлено на диаграммах (рис. 3).

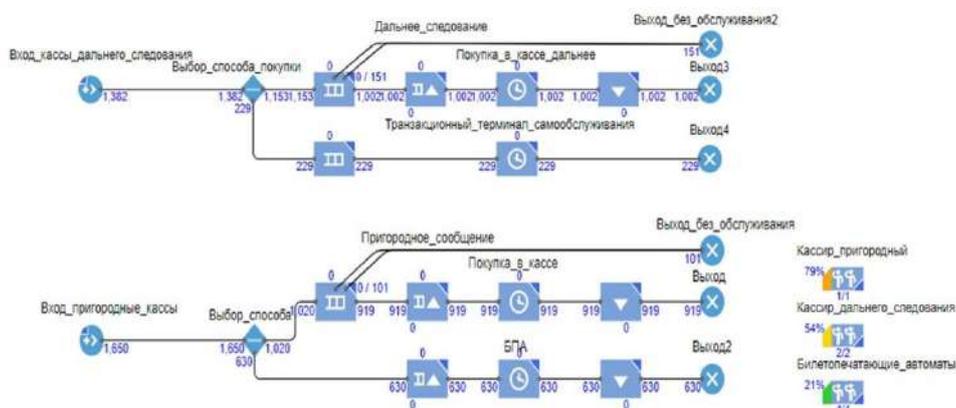


Рис. 2. Имитационная модель билетно-кассового обслуживания вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский
Fig. 2. Simulation model of ticketing and cash service of the station complex Irkutsk-Passenger



Рис. 3. Диаграммы соотношения обслуженных пассажиров и не обслуженных в кассах вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский

Fig. 3. Diagrams of the ratio of served passengers and those not served at the box office of the station complex Irkutsk-Passenger



Рис. 4. Временной график длины очередей в кассы вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский

Fig. 4. Time schedule of queue length at the ticket office of the Irkutsk-Passenger station complex

Анализ результатов моделирования билетно-кассового обслуживания показал, что количество пассажиров, не обслуженных в кассах дальнего следования, составило 151 чел., т.е. 11 % от общего числа, а в кассах пригородного следования не обслуженными остались 101 чел., что составило 6 % от всего числа пассажиров, пришедших в пригородные кассы за данные сутки.

Основные причины ухода пассажиров без обслуживания в кассах – образование очереди свыше установленной нормы (более 80 чел. в сут для касс пригородного следования, более 110 – для касс дальнего следования) или ожидание обслуживания более установленного времени (до 5 мин.) [12].

На рис. 4 представлен график зависимости длины очередей в кассы дальнего и пригородного сообщения с распределением по времени.

Из графиков (см. рис. 4) видно, что очередь в кассы пригородного сообщения достигает максимальных значений в период времени 1:00–4:00 и 14:00–15:00, что обусловлено высоким уровнем пассажиропотока в данное время и небольшим числом работающих касс. В кассы дальнего следования максимальная очередь образуется в период от 1:00 до 3:30 и с 16:00 до 17:00 по аналогичной причине.

Очевидно, что образование очередей не является причиной ухода не обслуженных пассажиров, так как длина очереди за сутки практически не превышала установленных норм [13].

Оценка количества посетителей (%) в зависимости от времени ожидания обслуживания (мин.) представлена в виде гистограммы на рис. 5.

Из гистограммы видно, что около 75 % посетителей касс дальнего следования находились в очереди до 5 мин., 15 % – 20–30 мин., в итоге 11 % посетителей (см. рис. 3) ушли не обслуженными после 30 мин. ожидания. Около 65 % посетителей касс пригородного сообщения находились в очереди менее 5 мин., а 10 % ждали обслуживания 20–25 мин., в итоге 6 % посетителей ушли, не дождавшись обслуживания (см. рис. 4). Понятно, что основной причиной ушедших без обслуживания пассажиров является длительное ожидание в очереди (в кассы дальнего следования более 25 мин., в пригородные кассы – более 20 мин.).

Долгое ожидание в очереди связано с

существующим расписанием работы касс и установленным числом кассиров. Так, во время наиболее интенсивного пассажиропотока (с 5:00 до 9:00 часов по местному времени), работает одна касса для поездов дальнего следования, а во время перерыва не работает ни одна из касс [14].

Для решения данной проблемы на основе результатов и выводов, полученных из представленной имитационной модели билетно-кассового обслуживания вокзального комплекса Иркутск-пассажирский, в рамках исследования была произведена корректировка расписания работы касс и получены результаты, удовлетворяющие заявленным требованиям. Модель работы билетных касс по оптимизированному расписанию представлена на рис. 6.

На диаграмме можно увидеть, что число



Рис. 5. Гистограмма количества посетителей (%) в зависимости от времени ожидания обслуживания (мин.)

Fig. 5. Histogram of the number of visitors (%) depending on the waiting time for service (minutes)

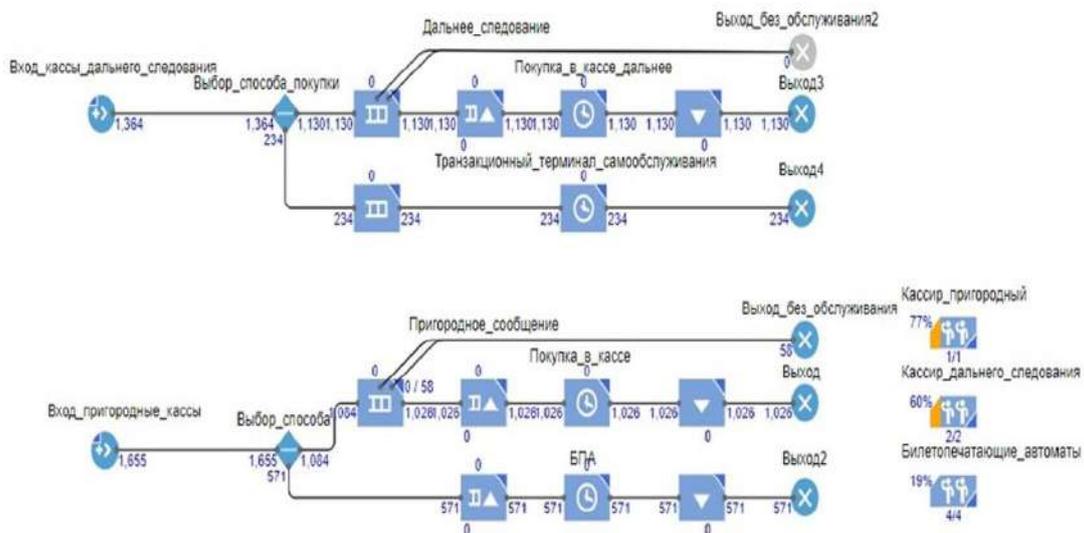


Рис. 6. Имитационная модель билетно-кассового обслуживания с учетом оптимизации процесса работы

Fig. 6. Simulation model of ticketing and cash services, taking into account the optimization of the work process

неудовлетворенных пассажиров дальнего следования снизилось со 151 чел. до нуля, а пригородного – со 101 пассажира до 58, т.е. сократилось почти в два раза.

Заключение

В настоящее время переориентация на развитие внутреннего туризма в нашей стране считается национальным приоритетом. В связи с этим запущены национальный проект «Туризм и индустрия гостеприимства» и государственная программа «Развитие туризма», целью которых является доступность поездок для всех жителей России, в том числе за счет обновления транспортной инфраструктуры [15]. Учитывая, что именно поезда в ближайшей перспективе станут основным видом транспорта для всех типов туристов, важное значение приобретает проблема обеспечения безопасности пассажира или посетителя вокзального комплекса на всех уровнях передвижения, а также гарантия высокого уровня комфорта и сервисного обслуживания [16].

Учитывая, что потоки пассажиров характеризуются неравномерностью (суточной, сезонной, годовой), важным требованием при предоставлении транспортных услуг, в том числе на вокзалах, является моментальная реакция на все изменения интенсивности пассажиропотоков. Именно методы имитационного моделирования сегодня позволяют быстро реагировать на любые изменения в бизнес-процессах и получать мгновенный результат [15].

Проведенное исследование демонстриру-

ет возможность применения программного обеспечения AnyLogic для имитационного моделирования процессов работы вокзального комплекса на примере ст. Иркутск-Пассажирский. В ходе работы был проведен анализ расписания пассажирских и пригородных поездов, работы билетных касс, распределения пассажиропотоков. В работе рассмотрено моделирование процессов, происходящих на вокзальном комплексе Иркутск-Пассажирский в существующих условиях, и предложены варианты по улучшению качества обслуживания посетителей вокзального комплекса.

Разработанная имитационная модель билетно-кассового обслуживания в программной среде AnyLogic показала, что данная модель проста в использовании, позволяет быстро изменять входные данные и моментально получать новый результат. Модель может применяться для планирования режима работы билетных касс на любой день и обеспечивать запросы посетителей в режиме реального времени [17].

Экономическое обоснование внедрения программного обеспечения AnyLogic на вокзальном комплексе Иркутск-Пассажирский позволило сделать вывод, что установка данного продукта приведет к ускорению проведения анализа процессов работы вокзального комплекса. Это даст экономический эффект порядка 7 млн руб. в год, а срок окупаемости составит 0,24 года, т.е. не более трех месяцев [18].

Список литературы

1. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 19.03.2019 № 466 (ред. 13.10.2022). URL : <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201903210017> (Дата обращения 12.01.2023).
2. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : сайт. URL: <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 17.01.2023).
3. AnyLogic : сайт. URL : <https://www.anylogic.ru/> (Дата обращения 10.01.2023).
4. Рудин Р.Ю. Решение транспортных задач с помощью имитационного моделирования // Достижения науки и образования. 2016. № 11 (12). С. 12–16.
5. Об утверждении типового технологического процесса работы железнодорожного вокзального комплекса : распоряжение ОАО «РЖД» от 23.09.2020 № 2072/р (ред. 10.10.2022). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
6. Об утверждении Типовых требований к размещению, эксплуатации, обслуживанию и ремонту пассажирских устройств на железнодорожных линиях : распоряжение ОАО «РЖД» от 1.12.2021 № 2695/р. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
7. ГОСТ Р 58171-2018. Услуги на железнодорожном транспорте. Требования к обслуживанию пассажиров на вокзальных комплексах. Введ. 2018–12–01. М. : Стандартинформ, 2018. 22 с.
8. Пазойский Ю.О. Организация пригородных железнодорожных перевозок. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. 270 с.
9. Свистунова А.С., Хасанов Д.С., Кравец Д.М. Имитационное моделирование на железнодорожном вокзале в программной среде AnyLogic // Системный анализ и проектирование в управлении : сб. науч. тр. XXIV Междунар. науч. и учеб.-практ. конф. СПб., 2020. Ч. 2. С. 274–282.
10. Свистунова А.С., Хасанов Д.С. Имитационное моделирование процессов обслуживания пассажиров на железно-

дорожном вокзале // Транспорт России: проблемы и перспективы-2020 : материалы Юбилейной междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2020. Т. 2. С. 28–32.

11. Елуферьева Ю.С., Пальмов С.В. Моделирование работы железнодорожного вокзала средствами AnyLogic // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12-1 (78). С. 121–127.

12. Козлов П.А., Колокольников В.С., Копылова Е.В. Об имитационном моделировании и имитационных системах // Транспорт Урала. 2019. № 1 (60). С. 3–6.

13. Смесова К.С., Кандрашина Т.Е., Баусова З.И. Имитационная модель системы обслуживания пассажиров железнодорожного вокзала // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сб. ст. XVII Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2017. С. 211–215.

14. Особенности моделирования пассажиропотока объектов транспортной инфраструктуры / С.П. Вакуленко, Н.Ю. Евренова, О.И. Коровкина и др. // Экономика железных дорог. 2021. № 7. С. 41–47.

15. Svistunova A.S. Using the AnyLogic software product in modeling the passenger traffic of a railway station // Computing, Telecommunications and Control. 2020. Vol. 13. № 4. P. 54–65.

16. Чубарова И.А. Вокзалы. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2014. 168 с.

17. Никонова Я.И., Проскурякова Е.А. Цифровизация железнодорожных вокзальных комплексов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2022. Т. 8. № 3. С. 31–44.

18. Экономика пассажирского транспорта / В.А. Персианов, Е.А. Макарова, А.И. Забоев и др. М. : КноРус, 2012. 400 с.

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 19.03.2019 № 466 (red. 13.10.2022) «Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO «RZHD» do 2025 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation. Federation dated March 19, 2019 No 466 (ed. October 13, 2022) «Long-term development program of JSC «Russian Railways» until 2025»]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201903210017> (Accessed January 12, 2023).

2. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed January 17, 2023).

3. AnyLogic. Available at: <https://www.anylogic.ru/> (Accessed January 10, 2023).

4. Rudin R.Yu. Reshenie transportnykh zadach s pomoshch'yu imitatsionnogo modelirovaniya [Solving transport problems using simulation modeling]. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya* [Achievements of science and education], 2016, no. 11 (12), pp. 12–16.

5. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 23.09.2020 № 2072/r (red. 10.10.2022) «Ob utverzhdenii tipovogo tekhnologicheskogo protsessa raboty zheleznodorozhnogo vokzal'nogo kompleksa» [Order of JSC «Russian Railways» dated September 23, 2020 No 2072/r (ed. October 10, 2022) «On approval of the standard technological process of the railway station complex»].

6. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 1.12.2021 № 2695/r « Ob utverzhdenii Tipovykh trebovaniy k razmeshcheniyu, ekspluatatsii, obsluzhivaniyu i remontu passazhirskekh obustroystv na zheleznodorozhnykh liniyakh» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 1, 2021 No 2695/r «On approval of Standard Requirements for the placement, operation, maintenance and repair of passenger facilities on railway lines»].

7. GOST R 58171-2018. Uslugi na zheleznodorozhnom transporte. Trebovaniya k obsluzhivaniyu passazhirov na vokzal'nykh kompleksakh [State Standard R 58171-2018. Services in railway transport. Requirements for passenger service at railway stations]. Moscow: Stadartinform Publ., 2018. 22 p.

8. Pazoiskii Yu.O. Organizatsiya prigorodnykh zheleznodorozhnykh perevozok [Organization of suburban rail transportation]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2015. 270 p.

9. Svistunova A.S., Khasanov D.S., Kravets D.M. Imitatsionnoe modelirovanie na zheleznodorozhnom vokzale v programmnoi srede AnyLogic [Simulation modeling at a railway station in the AnyLogic software environment]. *Sbornik nauchnykh trudov XXIV Mezhdunarodnoi nauchnoi i uchebno-prakticheskoi konferentsii «Sistemnyi analiz i proektirovanie v upravlenii» (v 3 ch.)* [Proceedings of the XXIV International Scientific and educational-practical conference «System analysis and design in management» (in 3 parts)]. Saint Petersburg, 2020, part 2, pp. 274–282.

10. Svistunova A.S., Khasanov D.S. Imitatsionnoe modelirovanie protsessov obsluzhivaniya passazhirov na zheleznodorozhnom vokzale [Simulation modeling of passenger service processes at a railway station]. *Materialy Yubileinoi mezhdunarodnoi-nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport Rossii: problemy i perspektivy-2020»* [Proceedings of the Jubilee International scientific and Practical conference «Transport of Russia: problems and prospects-2020»]. Saint Petersburg, 2020, vol. 2, pp. 28–32.

11. Elufer'eva Yu.S., Pal'mov S.V. Modelirovanie raboty zheleznodorozhnogo vokzala sredstvami Anylogic [Modeling of the railway station operation by means of Anylogic]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International scientific research journal], 2018, no. 12-1 (78), pp. 121–127.

12. Kozlov P.A., Kolokol'nikov V.S., Kopylova E.V. Ob imitatsionnom modelirovanii i imitatsionnykh sistemakh [About simulation modeling and simulation systems]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2019, no. 1 (60), pp. 3–6.

13. Smesova K.S., Kandrašina T.E., Bausova Z.I. Imitatsionnaya model' sistemy obsluzhivaniya passazhirov zheleznodorozhnogo vokzala [Simulation model of the railway station passenger service system]. *Sbornik statei XVII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike»* [Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference «Problems of informatics in education, management, economics and technics»]. Penza, 2017, pp. 211–215.

14. Vakulenko S.P., Evreenova N.Yu., Korovkina O.I., Alekseeva K.V. Osobennosti modelirovaniya passazhiropotoka ob'ektov transportnoi infrastruktury [Features of passenger traffic modeling of transport infrastructure facilities]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economy of railways], 2021, no. 7, pp. 41–47.

15. Svistunova A.S. Using the AnyLogic software product in modeling the passenger traffic of a railway station // Computing, Telecommunications and Control, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 54–65.

16. Chubarova I.A. Vokzaly [Train stations]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2014. 168 p.

17. Nikonova Ya.I., Proskuryakova E.A. Tsifrovizatsiya zheleznodorozhnykh vokzal'nykh kompleksov [Digitalization of railway station complexes]. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii* [Innovative transport systems and technologies], 2022, vol. 8, no. 3, pp. 31–44.

18. Persianov V.A., Makarova E.A., Zaboev A.I., Proshkina E.S., Sysoeva E.A., Fedorov L.S., Rasikhina L.F., Kozlova N.A., Tettsoeva E.M., Kurbatova A.V., Metelkin P.V., Bednyakova E.B., Khrushchev M.V., Glukhov A.K., Kravchenko M.V., Ignatova Ya.S. *Ekonomika passazhirsogo transporta* [Economy of passenger transport]. Moscow: KnoRus Publ., 2012. 400 p.

Информация об авторах

Чубарова Ирина Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: ia7chubarova@gmail.com.

Доможирова Алена Дмитриевна, старший преподаватель кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: zenitalena@mail.ru.

Information about the authors

Irina A. Chubarova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operational Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: ia7chubarova@gmail.com.

Alena D. Domozhirova, Assistant Professor of the Department of Operational Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: zenitalena@mail.ru.

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

**ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ**

**COMPUTER SCIENCE, INFORMATION MANAGEMENT
AND PROCESSING**

Применение алгоритма нечеткой логики Мамдани для оценки качества моделей искусственного интеллекта на основе имеющихся данных

С.Т. Дусакаева✉, М.П. Носарев, И.А. Хохлов, П.Л. Нириян

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Российская Федерация

✉slushashdusakaeva@rambler.ru

Резюме

В статье рассмотрена актуальная проблема трудоемкости и высокой стоимости разработки систем или моделей искусственного интеллекта в связи с низким качеством используемых данных. Изучены виды и направления корреляционной связи между различными метриками качества данных и точности работы итоговой модели искусственного интеллекта. Отмечено, что в современном мире наблюдается проникновение искусственного интеллекта практически во все области человеческой деятельности: здравоохранение, агропродовольственная сфера, промышленность, творческие направления. Обоснована актуальность поставленной проблемы и проведен краткий обзор современных исследований, связанных с изучением взаимокорреляции качества данных и точности искусственного интеллекта. Указано, что плохие данные приводят к значительным финансовым потерям, повышают трудоемкость разработки систем или моделей искусственного интеллекта. На основе проведенных исследований в различных областях применения искусственного интеллекта выделены пять характеристик больших данных, влияющих на точность разрабатываемого продукта: несогласованность, неполнота, недействительность, зашумленность, размер выборки. Для определения искомых зависимостей выбран алгоритм нечеткой логики Мамдани. Критерии оценки качества данных преобразованы в термины с нечеткими треугольными числами и сформированы правила нечеткого вывода. Построены графики зависимостей и сделаны выводы о наиболее важных критериях качества данных. Высокая зашумленность или несогласованность данных допустима лишь в небольших количествах, но точность моделей резко падает при усилении этих характеристик, неполнота или недействительность менее критично влияют на качество моделей, увеличение размера выборки имеет значимое влияние либо при высокой сложности модели, либо при относительно небольшой исходной выборке.

Ключевые слова

искусственный интеллект, качество данных, методы нечеткой логики, алгоритм Мамдани, критерии оценки качества данных

Для цитирования

Применение алгоритма нечеткой логики Мамдани для оценки качества моделей искусственного интеллекта на основе имеющихся данных / С.Т. Дусакаева, М.П. Носарев, И.А. Хохлов, П.Л. Нириян // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 170–180. DOI 10.26731/1813-9108.2023.(77).170-180.

Информация о статье

поступила в редакцию: 26.12.2022 г.; поступила после рецензирования: 13.03.2023 г.; принята к публикации: 14.03.2023 г.

Application of the Mamdani fuzzy logic algorithm to assess the quality of artificial intelligence models based on available data

S.T. Dusakaeva✉, M.P. Nosarev, I.A. Khokhlov, P.L. Niryan

Orenburg State University, Orenburg, the Russian Federation

✉slushashdusakaeva@rambler.ru

Abstract

This paper considers the actual problem of laboriousness and high cost of developing systems or models of artificial intelligence due to the low quality of the data used. The types and directions of the correlation between various metrics of data quality and the accuracy of the final artificial intelligence model are studied. It is noted that in the modern world there is a penetration of artificial intelligence into almost all areas of human activity: healthcare, agri-food, industry, creative areas. The relevance of the problem posed is substantiated and a brief review of modern studies related to the study of the correlation between data quality and artificial intelligence accuracy is carried out. It is noted that bad data lead to significant financial losses, increases the complexity of developing artificial intelligence systems or models. Based on the research conducted in various areas of artificial intelligence application, five characteristics of big data affecting the accuracy of the developed artificial intelligence have been identified: inconsistency, incompleteness, invalidity, noisiness, sample size. To determine the desired dependencies, the Mamdani fuzzy logic algorithm was chosen. Criteria for assessing data quality are converted into terms with fuzzy triangular numbers and fuzzy inference rules are formed. Dependence graphs are constructed and conclusions are drawn about the most important data quality criteria. High noise or data inconsistency are acceptable only in small quantities, but the accuracy of models drops sharply when these characteristics are enhanced, incompleteness or invalidity are less critical for the quality of models, increasing the sample size has a significant impact either with high model complexity or with a relatively small initial sample.

Keywords

artificial intelligence, data quality, fuzzy logic methods, Mamdani algorithm, data quality assessment criteria

For citation

Dusakaeva S.T., Nosarev M.P., Khokhlov I.A., Niryay P.L. Primenenie algoritma nechetkoi logiki Mamdani dlya otsenki kachestva modelei iskusstvennogo intellekta na osnove imeyushchikhsya dannykh [Application of the Mamdani fuzzy logic algorithm to assess the quality of artificial intelligence models based on available data]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 170–180. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).170-180.

Article Info

Received: December 26, 2022; Revised: March 13, 2023; Accepted: March 14, 2023.

Введение

Проблема разработки и внедрения искусственного интеллекта (ИИ) в повседневную жизнь в последние годы имеет высокую степень актуальности. По исследованию консалтинговой компании Accenture [1], одной из крупнейших в США, технологии машинного обучения обладают потенциалом повышения показателей прибыльности коммерческих организаций в среднем на 38 %, а также способны в значительной степени повысить уровень производительности труда человека. Отмеченный факт является одной из основных причин, по которой ИИ проникает почти во все сферы повседневной жизни.

Проведено немало исследований, показывающих, что ИИ станет основной частью цифровых систем здравоохранения, которые формируют и поддерживают современную медицину [2]. Например, исследователи из Всеиндийского института медицинских наук пришли к выводу, что ИИ позволит в будущем совершить прорыв в области медицины: эффективнее искать заболевания, учитывать множество факторов, быстрее синтезировать лекарства от заболеваний и др. В агропродовольственной сфере ИИ также будет способствовать развитию: от создания продукта и логистики его доставки до оценки рисков расхода бюджета на рекламу или производства какого-либо товара, причем гораздо быстрее и эффективнее людей [3]. Более того, по мнению департамента бухгалтерского учета Йоханнесбургского университета, ИИ многократно ускоряет наступление так называемой четвертой промышленной революции, в которой машина заменит человека почти во всех отраслях производства, что приведет к экономическому процветанию общества [4]. И даже в искусстве модели ИИ начинают находить свое применение, в деятельности, которую раньше считали лишь привилегией человека. Исследования, проведенные департаментом визуальных искусств Кали-

форнийского университета, свидетельствуют о том, что модели ИИ способны к творческой деятельности. Более того, нередко подобные работы выходят за грани человеческой фантазии и поражают воображение, многократно превосходя человека в этой сфере деятельности [5].

Распространение ИИ до сих пор не является столь массовым во многом благодаря трем фундаментальным проблемам:

- трудоемкость;
- дороговизна;
- недостаточность данных.

По оценкам экспертов [6], разработка хорошего ИИ по стоимости может быть дорогой, рискованной, кроме того, это долгий и трудоемкий процесс, включающий в себя сложности внедрения разработанных технологий в эксплуатацию и требующий привлечения высококвалифицированных специалистов.

Но ключевая проблема для любого ИИ – это данные, на которых и будет происходить процесс обучения. От качества используемых данных напрямую зависит качество создаваемого ИИ. Независимо от размеров выделяемого финансирования и высокой квалификации команды разработки, плохие данные чаще всего все равно будут приводить к получению отрицательного результата [7]. Разработанные с низкой точностью модели ИИ имеют низкую востребованность и неприменимы в областях, требующих высокой точности, например, в медицине, а также они могут принести многомиллионные убытки компании-разработчику. Это означает, что еще на этапе планирования разработки ИИ можно спрогнозировать итоговый результат, проведя первичный анализ имеющихся для обработки данных.

Таким образом, проблема оценки качества данных, используемых для обучения ИИ, становится особенно актуальной в настоящее время.

Существует явная неопределенность в том, что может пониматься под качеством данных, отсутствуют и четкие критерии методов оценки качества данных и корреляции этой характеристики с точностью ИИ. Для решения этой проблемы изучим современные исследования различных моделей ИИ, для разработки которых использовались данные с явными недостатками, и рассмотрим методы борьбы с этой проблемой.

В связи со сказанным представляется целесообразным при решении задачи оценки качества моделей ИИ на основе имеющихся данных привлечь модели и алгоритмы нечеткой логики.

Целью исследования является выявление с помощью инструментов нечеткой логики степени влияния метрик качества данных на качество ИИ.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Провести обзор современных исследований в области экспериментов, сопоставляющих качество данных и качество модели ИИ.

2. На основе изученных работ составить нечеткую модель корреляции качества данных и качества ИИ.

3. Составить нечеткую систему поддержки принятия решений с помощью Matlab Fuzzy Logic Toolbox.

4. Апробировать построенную нечеткую модель и сделать выводы.

Материалы и методы

Качество данных – это оценка полезности и надежности данных для достижения определенной цели. Есть много причин почему данные «портятся»: ошибки в измерениях, ручной ввод, потеря, устаревание данных. Аналитик данных из Google Ш. Шафеи, например, выделял следующие качества данных: полнота; уникальность; согласованность; своевременность; действительность [8].

Во-первых, исключим из предложенного списка уникальность, так как фильтрация повторяющихся данных не является проблемной, и своевременность, оценка которой кажется слишком сложной и спорной задачей. Добавим *зашумленность* данных и *размер выборки*, как достаточно очевидные характеристики качества данных.

Изучим каждую из характеристик детально.

Согласованность

Данный параметр будет рассмотрен на примере работы, посвященной роли ИИ в геофизических исследованиях [9].

Авторы изучали методы применения машинного обучения для автоматизации геофизических исследований, требующих для точной интерпретации результатов работы ИИ оценки экспертов.

При анализе интерпретации скважин, проведенных тремя разными экспертами, была сформулирована следующая гипотеза: экспертные оценки часто не согласуются друг с другом, и это в наибольшей степени относится к интерпретации всех типов пород. Несогласованность экспертных оценок оказывает сильное негативное влияние на качество работы классификаторов и ее следует учитывать.

В результате проводилось несколько экспериментов, показывающих действительность данной гипотезы. В эксперименте были задействованы два эксперта: Е и С. Они независимо проводили оценку трудно-отличаемых друг от друга вмещающих уран пород. В итоге было сформировано два неидентичных набора целевых меток для анализируемых участков, потенциально пригодных для добычи урана. В табл. представлено сравнение качества работы модели при обучении на оценках пород эксперта С, эксперта Е, обучение на обоих наборах сразу без информации в виде ID об эксперте, установившем конкретную метку, и обучение на обоих наборах сразу с информацией о том, кто какую метку установил, в виде ID эксперта.

Согласно данным (см. табл.), можно сделать некоторые выводы. Если подавать модели идентичные наборы признаков с противоречащими метками, то параметры качества модели резко упадут по сравнению с обучением на наборах с метками только от одного эксперта. Добавление же ID эксперта разделяет эти наборы меток, что позволяет модели выбирать, какому из экспертов можно доверять, что в большинстве своем усредняет качество модели между случаями обучения на метках только одного из экспертов.

Полнота и действительность

Полноту и действительность будем рассматривать, опираясь на результаты работы [10]. Авторы использовали два набора данных: набор с информацией о трафике транспорта, в котором

хранилась информация о среднесуточных показателях трафика транспорта по дорогам, и набор с информацией о состоянии погоды для предсказания дождя (влажность, температура, скорость ветра и т.д.).

Авторы для каждого набора данных проводили обучение на модели «дерево принятия решений» и ставили эксперименты в двух разных форматах: неполные объекты и недопустимые объекты. Значения были выбраны таким образом, чтобы отражать различные ситуации повреждения данных – мелкие, средние и крупномасштабные.

В результате проводимых экспериментов с отсутствующими объектами в данных, при низких и средних потерях данных качество моделей незначительно колебалось в пределах 1–2 %, а при преодолении порога потери 20 % данных о трафике машин и потери 30 % данных о температурных условиях качество моделей на тестовой выборке резко ухудшалось. Вероятно, мо-

дель просто не учитывала в вычислениях неполные данные до тех пор, пока пробелы не стали достаточно критическими.

Пример результатов работы можно увидеть на рис. 1. График сравнивает количество верно совершенных моделью прогнозов трафика движения автотранспорта в виде атрибута качества ассигасу при различных количествах некорректных объектов (от 0 до 15) и различной силе некорректности (от –1 до –10 000 проехавших машин).

Таким образом, очевидно, что достоверность данных более значимый признак данных, чем полнота. Современные модели обучены работать с пробелами в данных и качественно обрабатывать пропуски, однако они все еще не научены отсеивать некорректные данные. Это приводит к тому, что модели совершают много ошибок, доверяя объектам с абсурдными значениями целевых меток.

Сравнение результатов обучения модели с различными вариациями использования мнений двух экспертов

Comparison of learning outcomes of the model with different variations of using the opinions of two experts

Methods	Train	Test	Accuracy	Precision	Recall	F1
Expert C	45	12	0.5869	0.6491	0.4751	0.5486
Expert E	35	5	0.4722	0.5409	0.1963	0.2880
Experts C&E w/out ID	77	20	0.4401	0.4078	0.1365	0.2045
Experts C&E with ID	77	20	0.4996	0.5157	0.3529	0.4190

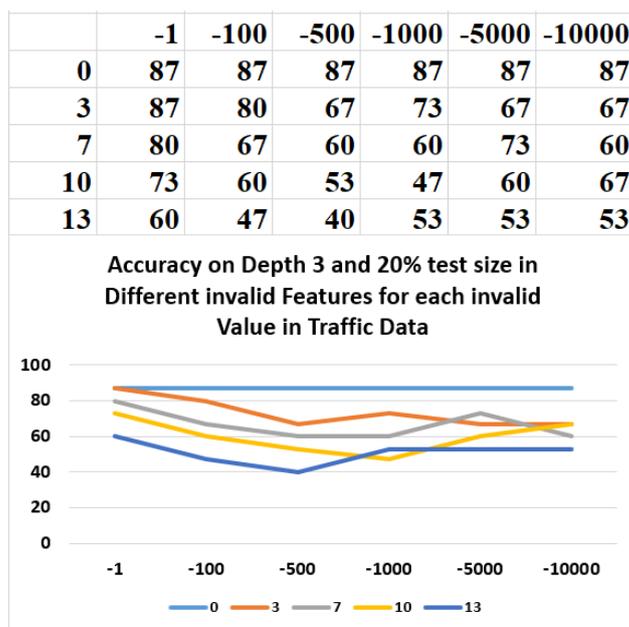


Рис. 1. Влияние недействительных признаков на качество модели
Fig. 1. Influence of invalid features on the quality of the model

Зашумленность

При изучении влияния зашумленности обучающей выборки на модель ИИ мы опирались на результаты исследования модели ИИ сканов МРТ мозга [11].

Авторы использовали 165 МРТ-сканирований от 88 субъектов туберкулезного склероза (TSC) (рис. 2).

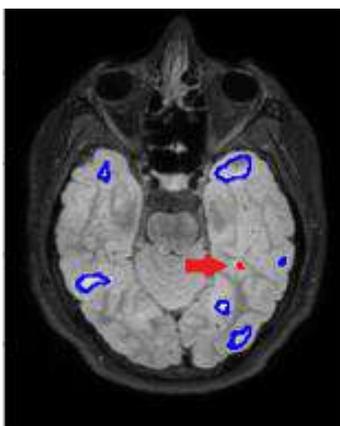


Рис. 2. Пример сканированного изображения мозга с опухолями

Fig. 2. Example of brain tumor scans

Опытный аннотатор сегментировал поражения в этих сканированиях. 12 изображений аннотаторы идеально поместили, остальные снимки представляли из себя шумный набор данных.

Далее авторы попытались сравнить базовое обучение нейронных сетей (CNN) и модификации этого метода, более устойчивые к шуму в данных. Исследования проводились на разных уровнях зашумленности данных, разделенных на уровни 1–5, а также отдельный «чистый» набор, заранее проверенный. Краткие результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 3.

В результате в зависимости от уровня шума (уровням 1–7 соответствуют равномерно растущие шумы от 2 до 17 % от всех данных), внесенного в обучающие данные, качество мо-

делей падало тем быстрее, чем больше было шума. Очевидно, что модификации CNN справлялись с шумовыми метками лучше, но общая тенденция падения качества моделей сохранялась на каждом усилении уровня шума.

Размер выборки

Исследование данной характеристики проводилось на основе сравнения точности моделей глубокого обучения CNN, Cubist (модификация деревьев решений) и PLSR (частичная регрессионная модель наименьших квадратов) для прогнозирования свойств почвы по данным спектроскопии в ближнем инфракрасном диапазоне [12].

У авторов был набор данных, включающий 12 044 образца почвы с 4 251 уникального участка. Для того чтобы лучше представить распределение почвы, авторы разделили и подгруппировали данные на основе участков. Набор данных был сначала случайным образом разделен на 75 % калибровки и 25 % валидации.

Из набора калибровочных данных были созданы выборки: 350, 840, 1 400, 2 800, 4 200, 5 600, 7 000, 7 650 образцов почв. Далее для сравнения авторы ввели две модели классического обучения PLSR и Cubist, которые соревновались с CNN. В целом модели PLSR и Cubist, как правило, работали лучше, когда размер выборки был относительно небольшим (< 1 500). Модель CNN начала показывать лучшую производительность по сравнению с моделями PLSR и Cubist на 3 000 образцов и более (рис. 4).

Очевидно, что количество данных имеет свой вес на небольших выборках, и вскоре качество моделей, зависимое от размера выборки, упирается в свой потолок на определенных значениях, после которых почти не растет. Причем этот потолок тем выше, чем сложнее модель.

	Clean data	noise level 1 (Method 1)	noise level 2 (Method 2)	noise level 3 (Method 3)	noise level 4 (Method 2)	noise level 5 (Method 3)	noise level 6 (Method 2)	noise level 7 (Method 2)
Average DSC of the training labels	1.000	0.949	0.924	0.854	0.807	0.790	0.777	0.742
Baseline CNN	0.878	0.889	0.862	0.846	0.755	0.730	0.736	0.724
Baseline CNN trained with MAE loss	-	0.881	0.864	0.840	0.780	0.741	0.778	0.760
Dual CNNs with iterative label update	-	0.906	0.895	0.886	0.849	0.804	0.773	0.732

Рис. 3. Результаты исследований влияния шума на обучение модели CNN

Fig. 3. Results of studies of the influence of noise on the CNN model training

Формирование нечеткой системы

Нечеткая система зависимости точности модели от качества данных сформирована с помощью инструмента MathLab в интерактивном режиме использования графических средств пакета Fuzzy Logic Toolbox.

Алгоритм Мамдани [13–15], используемый в данном исследовании, реализуется формулой:

$$\mu'(y) = \min \{c_i, \mu(y)\} \quad (1)$$

где c_i – степень истинности i -го подзаключения; $\mu(y)$ – функция принадлежности терма; $\mu'(y)$ – «активизированная» функция принадлежности.

В источниках [13, 14] (1) называют мин-активацией, поскольку она позволяет вычислять показатель истинности для каждого подзаключения $c_i = d_i \cdot F_i$, где d_i – i -ое подзаключение, F_i – весовые коэффициенты степени уверенности в i -ом подзаключении, $i = 1 \dots q$. Далее каждое i -ое подзаключение сопоставляется с соответствующим множеством D_i – области определения для d_i , со своей новой функцией принадлежности. Она вычисляется как минимум из значения функции принадлежности терма подзаключения и c_i .

В качестве выходного параметра выбрана абстрактная точность модели ИИ. Под точностью будем понимать универсальный параметр с областью значений, заключенных от 0 до 1, который для каждого конкретного типа модели ИИ может интерпретироваться различно. В качестве опоры для определения нечетких термов

конструированной модели используются ранее обозначенные метрики качества данных. Уровень влияния каждой метрики на качество итоговой модели ИИ оценивается на основе ранее рассмотренных исследований [10–13].

В конструируемой модели точность имеет вид треугольных нечетких чисел, представленных на рис. 5 с термами:

- очень низкая точность (0; 0; 0,4);
- низкая точность (0,2; 0,5; 0,7);
- приемлемая точность (0,4; 0,6; 0,75);
- высокая точность (0,6; 0,8; 0,95);
- очень высокая точность (0,9; 1; 1).

Характеристика согласованности организована со следующими термами: несогласованные данные, несогласованные данные с меткой, согласованные данные. Согласованность можно отразить в процентном совпадении ответов экспертов:

- несогласованность (0; 0; 0,9);
- согласованность (0,9; 1; 1).

Пример терма полноты представлен на рис. 6. Характеристики полноты и действительности организованы со следующими термами:

- отсутствие неполноты или недействительности (0; 0; 0,05);
- низкая неполнота или недействительность (0; 0,08; 0,14);
- средняя неполнота или недействительность (0,07; 0,12; 0,4);
- высокая неполнота или не-

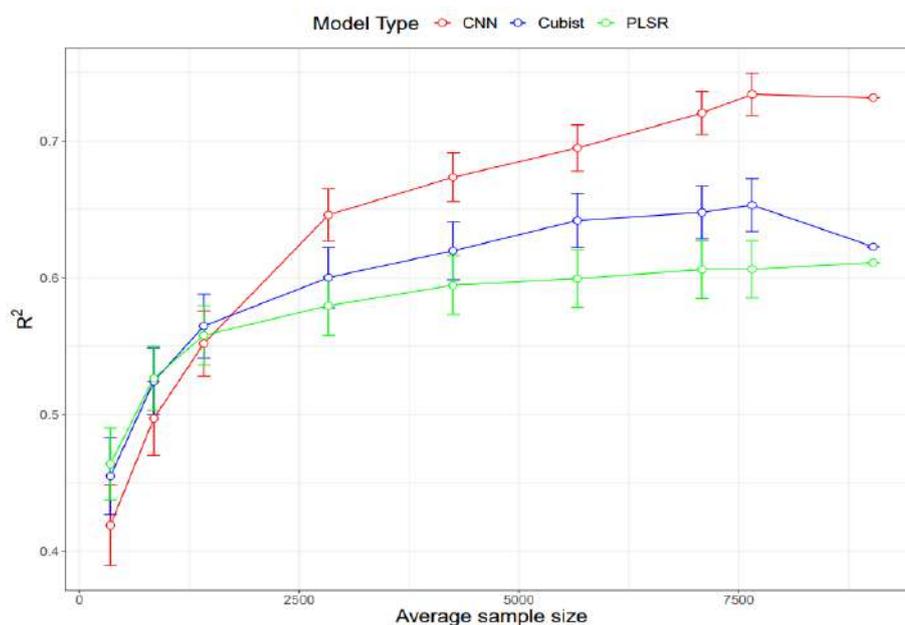


Рис. 4. Влияние размера выборки на качество моделей

Fig. 4. Effect of sample size on the quality of models

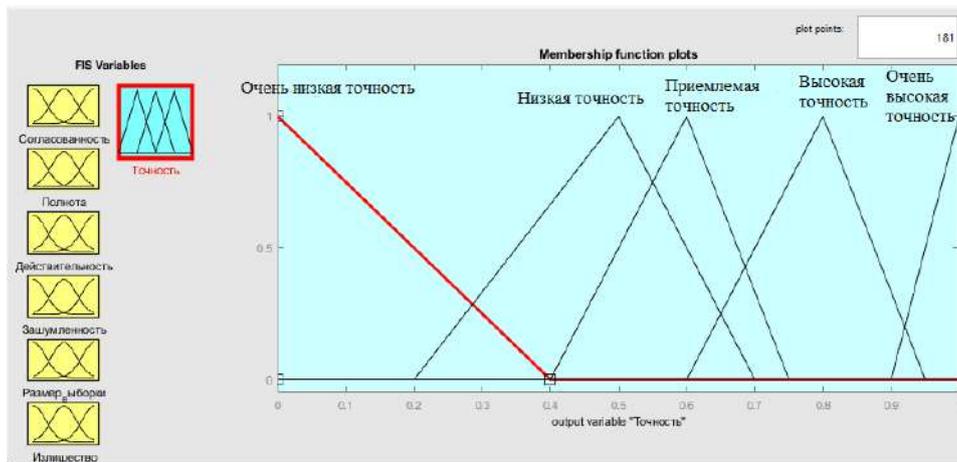


Рис. 5. Пример реализации треугольной термы точности
 Fig. 5. An example of the implementation of a triangular accuracy term

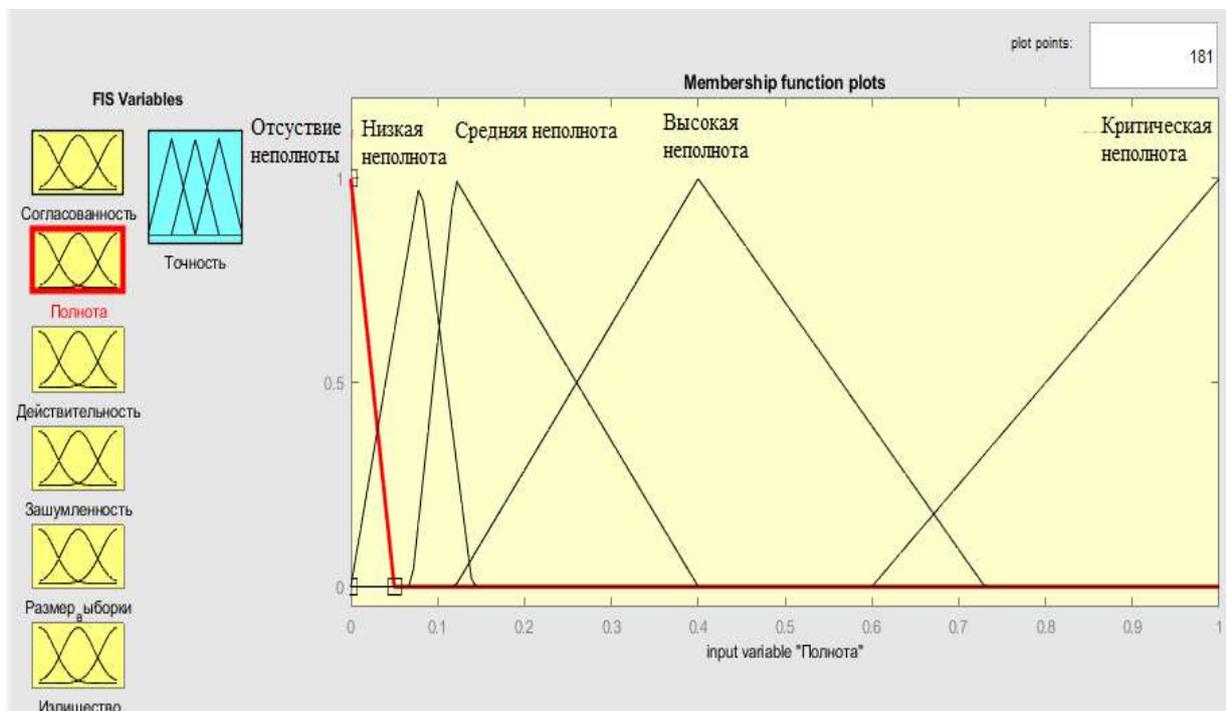


Рис. 6. Пример реализации треугольных термов полноты
 Fig. 6. An example of the implementation of triangular completeness terms

действительность (0,12; 0,4; 0,73);

– критическая неполнота или недействительность (0,6; 1; 1).

Характеристика зашумленности организована со следующими термами:

– чистый набор данных (0; 0; 0,04), уровень шума 1 (0; 0,05; 0,13);

– уровень шума 2 (0,05; 0,09; 0,2);

– уровень шума 3 (0,12; 0,15; 0,33);

– уровень шума 4 (0,2; 0,28; 0,4);

– уровень шума 5 (0,3; 0,45; 0,5).

Характеристика размера выборки организована со следующими термами:

– малая выборка (1 000, 1 500, 2 000);

– средняя выборка (2 000, 4 000, 5 000);

– большая выборка (4 000, 10 000, 10 000).

На рис. 7 показано окно редактора правил, в котором было создано 48 нечетких правил. На рис. 8 изображено окно графического отображения логических правил в Fuzzy Logic Toolbox.

Разработана система поддержки принятия

решений для предсказания точности модели ИИ, создаваемой по имеющимся данным. Она построена на теории нечетких множеств [16–18] и нечеткой логике [19–22], где основой является алгоритм Мамдани. Она позволяет эксперту оценить качество имеющихся данных и заранее предсказать возможный результат разработанного и обученного на этих данных ИИ.

На базе работы созданной системы иссле-

дуем модель по параметрам: согласованность, полнота, действительность, зашумленность, размер выборки.

На рис. 9–11 представлены некоторое гиперплоскости, отражающие нижеприведенные выводы:

– согласованность между данными критически важна ($> 0,9$), противоречивые данные значительно снижают точность модели ИИ;

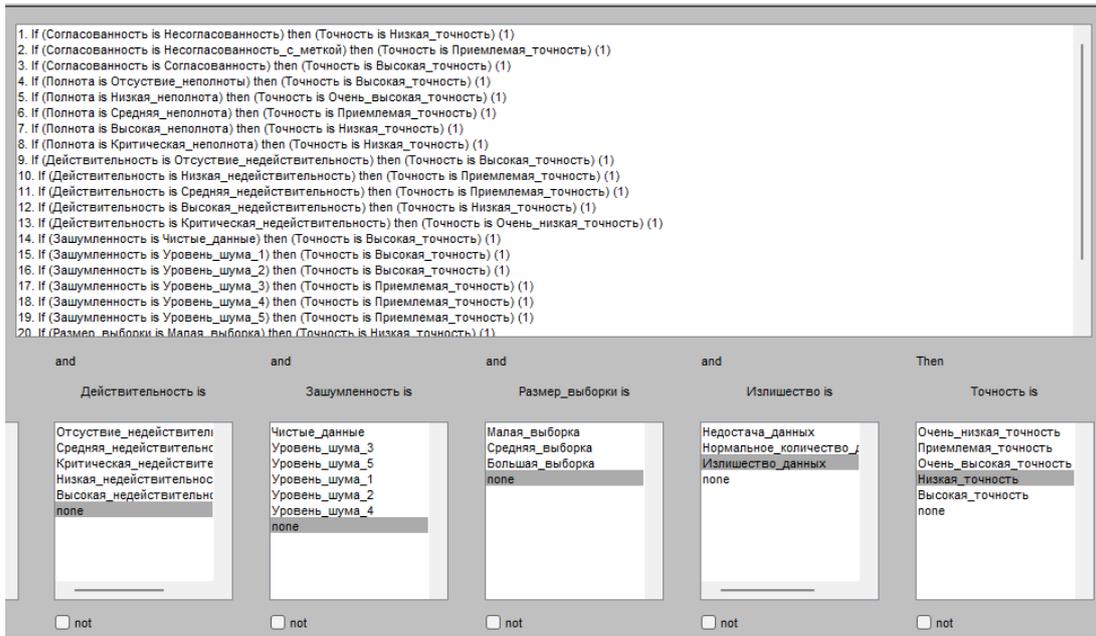


Рис. 7. Просмотр окна редактора правил
Fig. 7. Viewing the rule editor window

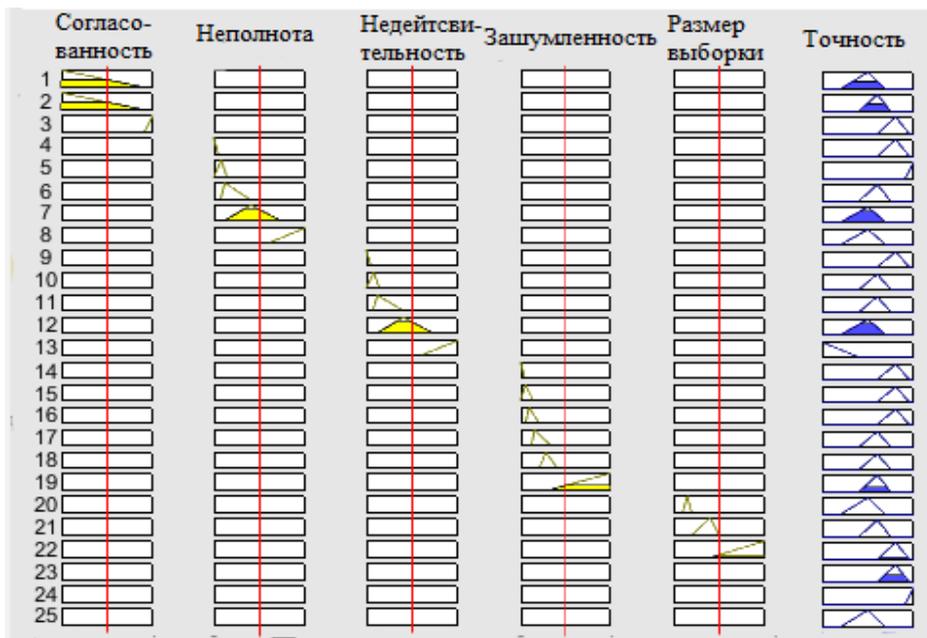


Рис. 8. Просмотр логических правил в редакторе
Fig. 8. Viewing logical rules in the editor

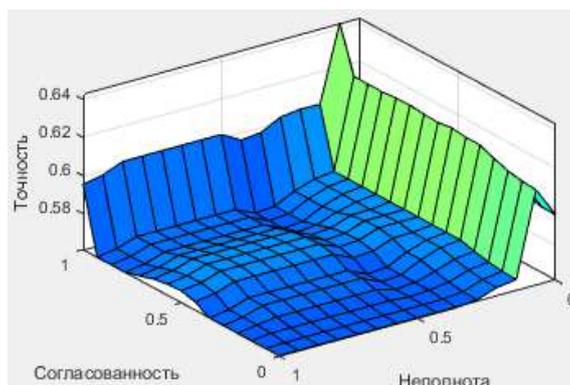


Рис. 9. Гиперплоскость «согласованность – неполнота»

Fig. 9. Hyperplane «consistency – incompleteness»

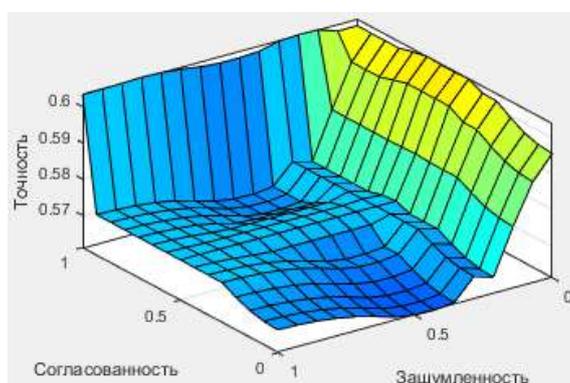


Рис. 10. Гиперплоскость «согласованность – зашумленность»

Fig. 10. Hyperplane «consistency – noisiness»

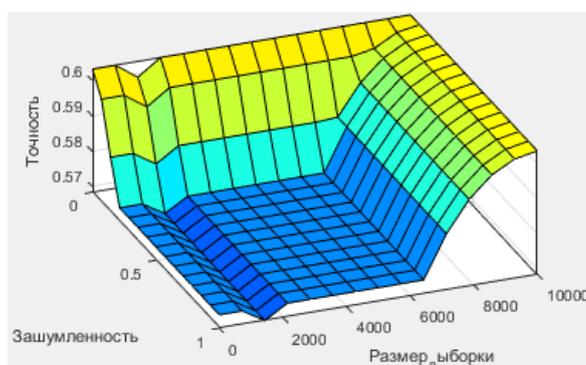


Рис. 11. Гиперплоскость «зашумленность – размер выборки»

Fig. 11. Hyperplane «noisiness – sampling size»

– неполнота не является очень важной характеристикой в оценке качества данных, серьезный ущерб модели наносится при отсутствии примерно более 40 % данных;

– недействительность в небольших объемах ($< 0,1$) легко распознается моделями, но дальнейший рост процента недействительных данных экспоненциально снижает качество моделей ИИ, приближая к нулевым показателям при более чем 50 % недействительных данных;

– зашумленность данных влияет на модели ИИ абсолютно аналогично недействительности;

– рост размера выборки логарифмически повышает точность модели ИИ, т. е. при достаточно больших объемах данных дальнейшее их увеличение почти не будет оказывать влияния на точность модели ИИ.

Заключение

В результате проведенного исследования

разработана система поддержки принятия решения, позволяющая предварительно оценить качество правильно разработанной системы ИИ на основании имеющихся данных. Основным инструментальным средством выбран алгоритм Мамдани, с помощью которого построена нечеткая система. Для построения этой системы использована среда программирования Matlab Fuzzy Logic Toolbox. Построенная нечеткая модель апробирована. Полученные результаты

могут быть разобраны и учтены компаниями, планируемыми вкладываться в развитие ИИ по их направлению.

Примененный в проведенном исследовании подход предварительной оценки качества ИИ, основанный на нечетком алгоритме Мамдани, позволит лицам, принимающим решение вкладываться в создание ИИ, более здраво оценивать риски.

Список литературы

1. Purdy M., Daugherty P. How AI Boosts Industry Profits and Innovation. Dublin : Accenture Institute for High Performance, 2017. 28 p.
2. Overview of artificial intelligence in medicine / P. Amisha, M. Malik, Pathania et al. // *Journal of Family Medicine and Primary Care*. 2019. № 8 (7). P. 2328–2331. DOI 10.4103/jfmipc.jfmipc_440_19.
3. Baruchelli P., Botto F., Cimatti A. Overview on maturity of AI innovations in manufacturing. URL: https://eit.europa.eu/sites/default/files/overview_on_maturity_of_ai_innovations_in_manufacturing_20529-d11.pdf (Access date 21.10.2022).
4. Mhlanga D. Artificial Intelligence in the Industry 4.0, and Its Impact on Poverty, Innovation, Infrastructure Development, and the Sustainable Development Goals: Lessons from Emerging Economies? URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/5788> (Access date 21.10.2022).
5. Mingyong C. The Creativity of Artificial Intelligence in Art // *Proceedings of the 2021 Summit of the International Society for the Study of Information*. Sendai, Los Angeles, 2021. Vol. 81, Iss. 1. URL: <https://www.mdpi.com/2504-3900/81/1/110> (Access date 21.10.2022).
6. Mun J., Housel T.J., Jones R.D. Acquiring artificial intelligence systems: Development challenges, implementation risks, and cost/benefits opportunities. URL: https://www.researchgate.net/publication/351703250_Acquiring_Artificial_Intelligence_Systems_Development_Challenges_Implementation_Risks_and_CostBenefits_Opportunities (Access date 21.10.2022).
7. Everyone wants to work with a model, not with data: data cascades in high-stakes AI / N. Sambasivan, S. Kapania, H. Highfill et al. // *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Yokohama, 2021. URL: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3411764.3445518> (Access date 21.10.2022).
8. Shafei S. Data quality for everyday analysis // *Towards Data Science*, 2020. URL: <https://towardsdatascience.com/data-quality-for-everyday-analysis-d3aa1442c31> (access date 21.10.2022).
9. Assessing the impact of expert labelling of training data on the quality of automatic classification of lithological groups using artificial neural networks / Y. Kuchin, R.I. Mukhamediev, K. Yakunin et al. // *Applied Computer Systems*. 2020. Vol. 25. № 2. P. 145–152.
10. Azimi S., Pahl C. The Impact of Data Completeness and Correctness on Explainable Machine Learning Models // *Journal of Data Intelligence*. 2022. Vol. 3. № 2. P. 218–231.
11. Deep learning with noisy labels: Exploring techniques and remedies in medical image analysis / D. Karimi, H. Dou, S.K. Warfield et al. // *Medical Image Analysis*. 2020. Vol. 65. № 5. P. 101759. DOI: 10.1016/j.media.2020.101759.
12. The influence of training sample size on the accuracy of deep learning models for the prediction of soil properties with near-infrared spectroscopy data / Ng Wartini, B. Minasny, W. de S. Mendes et al. // *Soil*. 2020. Vol. 6, № 2. P. 565–578.
13. Болодурина И.П., Дусакаева С.Т. Введение в теорию нечетких множеств и систем. Оренбург : ОГУ, 2021. 172 с.
14. Киселев В.Ю., Калугина Т.Ф. Теория нечетких множеств и нечеткая логика. Задачи и упражнения. Иваново : ИГЭУ, 2019. 72 с.
15. Тихомирова А.Н., Клейменова М.Г. Нечеткие модели дискретной математики. М. : НИЯУ МИФИ, 2011. 108 с.
16. Хижняков Ю.Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени. Пермь : ПНИПУ, 2013. 156 с.
17. Хижняков Ю.Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление. Пермь : ПНИПУ, 2013. 303 с.
18. Бахусова Е.А. Элементы теории нечетких множеств. Тольятти : ТГУ, 2013. 116 с.
19. Зак Ю.А. Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных: Fuzzy-Технологии. М. : Либроком, 2013. 352 с.
20. Frank H. Fuzzy Methoden in der Wirtschaftsmathematik. Braunschweig, Wiesbaden : Vieweg & Sohn Verlag, 2002. 242 p.
21. Friedrich A. Logik und Fuzzy-Logik. Stuttgart : Expert Verlag, 2006. 319 p.
22. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. Прикладные нечеткие системы. М. : Мир, 1993. 368 с.

References

1. Purdy M., Daugherty P. How AI Boosts Industry Profits and Innovation. Dublin: Accenture Institute for High Performance, 2017. 28 p.
2. Amisha, Malik P., Pathania M., Rathaur V.K. Overview of artificial intelligence in medicine. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, 2019, no. 8 (7), pp. 2328–2331.
3. Baruchelli P., Botto F., Cimatti A. Overview on maturity of AI innovations in manufacturing (Electronic resource). Available at: https://eit.europa.eu/sites/default/files/overview_on_maturity_of_ai_innovations_in_manufacturing_20529-d11.pdf

(Accessed October 21, 2022).

4. Mhlanga D. Artificial Intelligence in the Industry 4.0, and Its Impact on Poverty, Innovation, Infrastructure Development, and the Sustainable Development Goals: Lessons from Emerging Economies? Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/5788> (Accessed October 21, 2022).

5. Mingyong C. The Creativity of Artificial Intelligence in Art. *Proceedings of the 2021 Summit of the International Society for the Study of Information*. Sendai, Los Angeles, 2021, vol. 81, iss. 1. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-3900/81/1/110> (Accessed October 21, 2022).

6. Mun J., Housel T.J., Jones R.D. Acquiring artificial intelligence systems: Development challenges, implementation risks, and cost/benefits opportunities Available at: https://www.researchgate.net/publication/351703250_Acquiring_Artificial_Intelligence_Systems_Development_Challenges_Implementation_Risks_and_CostBenefits_Opportunities (Accessed October 21, 2022).

7. Sambasivan N., Kapania S., Highfill H., Akrong D., Paritosh P., Aroyo L.M. «Everyone wants to work with a model, not with data»: data cascades in high-stakes AI. *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Yokohama, 2021. Available at: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3411764.3445518> (Accessed October 21, 2022).

8. Shafei S. Data quality for everyday analysis. *Towards Data Science*, 2020. Available at: <https://towardsdatascience.com/data-quality-for-everyday-analysis-d3aa1442c31> (Accessed October 21, 2022).

9. Kuchin Y., Mukhamediev R.I., Yakunin K., Grundspenki J. Assessing the impact of expert labelling of training data on the quality of automatic classification of lithological groups using artificial neural networks. *Applied Computer Systems*, 2020, vol. 25, no. 2, pp. 145–152.

10. Azimi S., Pahl C. The Impact of Data Completeness and Correctness on Explainable Machine Learning Models. *Journal of Data Intelligence*, 2022, vol. 3, no. 2, pp. 218–231.

11. Karimi D., Dou H., Warfield S.K., Gholipour A. Deep learning with noisy labels: Exploring techniques and remedies in medical image analysis. *Medical Image Analysis*, 2020, vol. 65, no. 5, p. 101759.

12. Wartini Ng, Minasny B., Mendes W. de S., Demattê J. A. M. The influence of training sample size on the accuracy of deep learning models for the prediction of soil properties with near-infrared spectroscopy data. *Soil*, 2020, vol. 6, no. 2, pp. 565–578.

13. Bolodurina I.P., Dusakaeva S.T. Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv i sistem [Introduction to the theory of fuzzy sets and systems]. Orenburg: OGU Publ., 2021. 172 p.

14. Kiselev V.Yu., Kalugina T.F. Teoriya nechetkikh mnozhestv i nechetkaya logika. Zadachi i uprazhneniya [Fuzzy set theory and fuzzy logic. Tasks and exercises]. Ivanovo: IGEU Publ., 2019. 72 p.

15. Tikhomirova A.N., Kleimenova M.G. Nechetkie modeli diskretnoi matematiki [Fuzzy models of discrete mathematics]. Moscow: NIYAU MIFI Publ., 2011. 108 p.

16. Khizhnyakov Yu.N. Algoritmy nechetkogo, neuronnogo i neuro-nechetkogo upravleniya v sistemakh real'nogo vremeni [Algorithms of fuzzy, neural and neuro-fuzzy control in real-time systems]. Perm': PNIPU Publ., 2013. 156 p.

17. Khizhnyakov Yu.N. Nechetkoe, neuronnoe i gibridnoe upravlenie [Fuzzy, neural and hybrid control]. Perm': PNIPU Publ., 2013. 303 p.

18. Bakhusova E.A. Eeementy teorii nechetkih mnozhestv [Elements of the theory of fuzzy sets]. Tol'yatti: TGU Publ., 2013. 116 p.

19. Zak Yu.A. Prinyatie reshenii v usloviyakh nechetkikh i razmytykh dannykh [Decision making in conditions of fuzzy and fuzzy data: Fuzzy-Technologies]. Moscow: Librokom Publ., 2013. 352 p.

20. Frank H. Fuzzy Methoden in der Wirtschaftsmathematik. Braunschweig ; Wiesbaden : Vieweg & Sohn Verlag, 2002. 242 p.

21. Friedrich A. Logik und Fuzzy-Logik. Stuttgart : Expert Verlag, 2006. 319 p.

22. Terano T., Asai K., Sugeno M. Prikladnye nechetkie sistemy [Applied fuzzy systems]. Moscow: Mir Publ., 1993. 368 p.

Информация об авторах

Дусакаева Слушаш Тугайбаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; e-mail: slushashdusakaeva@rambler.ru.

Носарев Максим Павлович, кафедра прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; e-mail: nosarev11082001@gmail.com.

Хохлов Иван Артурович, кафедра прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; e-mail: iv.hohlov-01@yandex.ru.

Нирян Павел Леонидович, кафедра прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; e-mail: niran908@gmail.com.

Information about the authors

Slushash T. Dusakaeva, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg; e-mail: slushashdusakaeva@rambler.ru.

Maxim P. Nosarev, Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg; e-mail: nosarev11082001@gmail.com.

Ivan A. Khokhlov, Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg; e-mail: iv.hohlov-01@yandex.ru.

Pavel L. Niryann, Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg; e-mail: niran908@gmail.com.

Методика и алгоритмы построения оптимальных программ диагностирования технических систем

В.В. Кашковский¹✉, В.В. Устинов², Л.Г. Чобанян²

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

²Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Иркутск, Российская Федерация

✉victor.kashkovskiy@mail.ru

Резюме

В работе предложена усовершенствованная методика оптимизации диагностических тестов для поиска отказов в технической системе с глубиной поиска до съемного блока, а также методики поиска отказов непосредственно в блоках с глубиной поиска до элемента. Исходным является метод ведущей функции, который применяется для квадратных матриц «признаки – состояния». В предлагаемом усовершенствованном методе ведущей функции рассматриваются прямоугольные матрицы «признаки – состояния», в которых число признаков заведомо больше числа состояний, что характерно для перехода от экспериментальных и испытательных моделей к серийным образцам. Такие матрицы используются при переходе от экспериментальных образцов к серийному производству авиационной техники. При этом возникает актуальная практическая задача минимизации числа измерительных приборов на борту авиационной техники. Ранее автоматизированное решение подобных задач не рассматривалось. Апробация алгоритмов, представленных в виде дерева и технологических карт поиска отказа, проведена на примере учебно-лабораторного стенда контроля работоспособности противопожарной системы ССП-2А и блока БИ-2АЮ. Предлагаемая методика применима для диагностирования любых технических систем и объектов эксплуатации. Кроме того, предложенные алгоритмы расчета количества требуемых проверок и их заданной последовательности могут быть использованы как для бортовых, так и для наземных автоматизированных систем контроля, что позволит определить минимальное количество установленных датчиков и, следовательно, снизить массово-габаритные характеристики бортовых систем и повысить их надежность.

Ключевые слова

программы диагностирования, отказы в технической системе, методы контроля и диагностирования, алгоритмы диагностирования, оптимизация диагностических тестов, дерево поиска отказа, технологические карты, метод ведущей функции, квадратные матрицы

Для цитирования

Кашковский В.В. Методика и алгоритмы построения оптимальных программ диагностирования технических систем / В.В. Кашковский, В.В. Устинов, Л.Г. Чобанян // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 181–193. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).181-193.

Информация о статье

поступила в редакцию: 17.03.2023 г.; поступила после рецензирования: 24.03.2023 г.; принята к публикации: 27.03.2023 г.

Methodology and algorithms for constructing optimal diagnostic programmes for technical systems

V.V. Kashkovskii¹✉, V.V. Ustinov², L.G. Chobanyan²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, the Russian Federation

✉victor.kashkovskiy@mail.ru

Abstract

The paper proposes an improved technique for optimizing diagnostic tests for finding failures in a technical system with a search depth of up to a removable block, as well as methods for finding failures directly in blocks with a search depth of up to an element. The initial method is the leading function method, which is used for square sign-state matrices. In the proposed improved method of the leading function, rectangular sign-state matrices are considered, in which the number of signs is obviously greater than the number of states, which is typical for the transition from experimental and test models to serial samples. Such matrices are used in the transition from experimental samples to serial production of aviation equipment. In this case, an urgent practical problem arises of minimizing the number of measuring instruments on board the aircraft. Previously, the automated solution of such problems was not considered. Approbation of the algorithms presented in the form of a tree and technological maps of failure search was carried out on the example of a training and laboratory stand for monitoring the performance of the SSP-2A fire-fighting system and the BI-2AYU block. The proposed technique can be used to diagnose any technical systems and objects of

operation. In addition, the proposed algorithms for calculating the number of required checks and their specified sequence can be used for both onboard and ground automated control systems, which will determine the minimum number of installed sensors and, therefore, reduce the weight and size characteristics of onboard systems and improve their reliability.

Keywords

diagnostic programs, failures in the technical system, control and diagnostic methods, diagnostic algorithms, optimization of diagnostic tests, failure search tree, process maps, leading function method, square matrices

For citation

Kashkovskii V.V., Ustinov V.V., Chobanyan L.G. Metodika i algoritmy postroeniya optimal'nykh programm diagnostirovaniya tekhnicheskikh sistem [Methodology and algorithms for constructing optimal diagnostic programmes for technical systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 181–193. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).181-193.

Article info

Received: March 17, 2023; Revised: March 24, 2023; Accepted: March 27, 2023.

Введение

Главной задачей инженерно-авиационной службы при эксплуатации авиационной техники (АТ) является обеспечение ее постоянной исправности и готовности к работе. Успешное решение этих задач во многом зависит от надежности современной техники. Это определяется большим потоком информации о состоянии исследуемых объектов и ограничением времени, которое отводится для контроля и диагностирования [1–25]. В настоящее время доказано, что до 30 % времени уходит именно на поиск отказа в системе.

Существующие в настоящее время бортовые и наземные автоматизированные системы контроля имеют целый ряд недостатков, одним из которых является ограниченность в распознаваемых отказах систем и устройств и необоснованность выбора программ контроля, т.е. последовательности и количества проверок работоспособности блоков [4, 5, 8].

Разработанное программное обеспечение по реализации алгоритмов оптимизации позволит по имеющимся принципиальным электрическим схемам бортовых систем для любого типа воздушного судна (ВС) в кратчайшие сроки построить технологические карты поиска отказов в виде «дерева». Предложена методика проведения проверки достоверности определяемого отказа, а также разработаны принципы обучения авиационных специалистов методике поиска отказов в среде Multisim [25].

Представленные методики и алгоритмы могут применяться в авиакомпаниях при разработке технологических карт поиска отказов и на этапах проектирования путем минимизации количества информационных датчиков для диагностирования бортовых технических систем.

При разработке программы, которая позволяет менять последовательность операций поиска отказов, необходимо учитывать статистические данные по наиболее ненадежным элементам.

Предлагаемые методики диагностирования состояния АТ могут быть использованы для различных систем и комплексов любых типов ВС [4].

Таким образом, в работе в целом предложена методика и алгоритмы оптимизации диагностических тестов для поиска отказов в технической системе с глубиной поиска до съемного блока, а также методики поиска отказов непосредственно в блоках с глубиной поиска до элемента.

Предложен подход диагностирования технических систем без затрат для установки дополнительного оборудования на находящиеся в эксплуатации объекты (самолеты, поезда, теплоходы и т.д.) путем разработки специальных технологических карт по поиску отказов, установки оптимального количества информационных датчиков для спроектированных объектов эксплуатации или введения предлагаемых в работе алгоритмов оптимального поиска отказов для бортовых автоматизированных систем контроля (БАСК) [4, 5].

Актуальность задачи минимизации количества информационных датчиков для диагностирования бортовых систем и предлагаемое решение

При проектировании предсерийных образцов АТ ее оснащают нештатными системами бортовых устройств регистрации полетных данных (БУР) и испытательными комплексами БАСК. С учетом непредсказуемости процесса

авиационных испытаний данные предсерийные системы оснащены заведомо избыточным (чем при серийном выпуске АТ) количеством датчиков. Это обычная практика авиационных испытаний. При таком подходе при переходе от испытаний к серийному производству АТ возникает актуальная практическая задача минимизации числа измерительных приборов на борту АТ. Актуальность подобной задачи проиллюстрируем рис. 1.

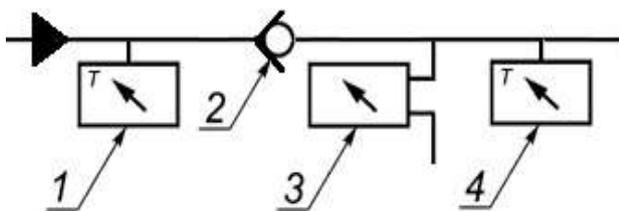


Рис. 1. Участок гидросистемы:

1 – датчик температуры D_1 (до отсечного клапана);
2 – отсечной клапан; 3 – датчик перепада давлений P_1 ; 4 – датчик температуры D_2 (датчик температуры после отсечного клапана)

Fig. 1. Hydraulic system section:

1 – temperature sensor D_1 (up to the cut-off valve);
2 – cut-off valve; 3 – differential pressure sensor P_1 ;
4 – temperature sensor D_2 (temperature sensor after cut-off valve)

В систему, показанную на рис. 1, поступает горячая гидросмесь под давлением и уходит в систему охлаждения.

Данный участок гидросистемы характеризуется следующими техническими состояниями (табл. 1).

Таблица 1. Таблица состояния системы

Table 1. System status table

Обозначение состояния Sign designation	Название состояния State name
S_1	Исправное состояние Operative state
S_2	Отказ отсечного клапана Cut-off valve failure
S_3	Повышенная температура в гидросистеме Elevated temperature in the hydraulic system

По результатам испытаний были получены и исследованы признаки состояний (табл. 2).

Таблица 2. Признаки состояний системы

Table 2. Signs of system states

Признак Sign	Состояние системы State of the system
x_1	$\overline{D_1}T \leq T_{\max \text{ доп}}$
x_2	$\overline{D_1}T > T_{\max \text{ доп}}$
x_3	$\overline{D_2}T \leq T_{\max \text{ доп}}$
x_4	$\overline{D_2}T > T_{\max \text{ доп}}$
x_5	$\overline{D_2}T < T_{\text{норм. экспл.}}$
x_6	$P_1P < P_{\min \text{ доп}}$
x_7	$P_1P \geq P_{\min \text{ доп}}$

Здесь, например, x_1 – максимально допустимая температура гидросмеси, измеренная датчиком D_1 ; x_6 – минимально допустимое давление в гидросистеме, измеренное датчиком P_1 и т.д.

При классической постановке задачи из таблиц состояний и признаков необходимо сформировать квадратную матрицу «признаки – состояния» (табл. 3).

Таблица 3. Классическая таблица

«признаки – состояния»

Table 3. The classic «signs – states» table

Признаки Signs	Состояния States		
	S_1	S_2	S_3
x_1	1	1	0
x_2	0	0	1
x_6	0	1	0

В данном примере все три признака имеют равную информативность, вычисленную через ведущую функцию W [1, 2]:

$$W_{xi} = n_0n_1 = 2, i = 1, 3 \text{ и } 6. \quad (1)$$

где n_0 и n_1 – количество нулей и единиц в строке x_i таблицы «признаки – состояния». Поэтому для упрощения представления новой методики, без проведения пошаговой минимизации, окончательно выберем минимальный набор признаков x_1 и x_6 .

Данный набор датчиков и признаков позволяет однозначно распознавать все три состояния системы. Однако полученное решение нельзя назвать оптимальным, потому что оно не учитывает стоимость датчиков с их установкой и эксплуатацией, количество используемых датчиков, их информативность и т.п.

В качестве решения предлагается использовать расширенную таблицу «признаки – состояния», охватывающую все результаты, полученные при эксплуатации предсерийной или опытной модели (табл. 4).

Таблица 4. Исследуемая таблица
«признаки – состояния»

Table 4. The investigated table «signs – states»

Признаки Signs	Состояния States		
	S_1	S_2	S_3
x_1	1	1	0
x_2	0	0	1
x_3	1	1	0
x_4	0	0	1
x_5	0	1	0
x_6	0	1	0
x_7	1	0	1

Как и в табл. 3 все признаки состояний имеют равную информативность (1). Отличие предлагаемого подхода в том, что при минимизации этой таблицы искусственно создаются три ветви минимизации по количеству используемых датчиков. С этой целью на первом шаге для каждой ветви минимизации выбирается наиболее информативный признак одного из неповторяющихся датчиков.

На последующих шагах минимизации для каждой ветви продолжаем выбирать наиболее информативные признаки образующего эту ветвь датчика до тех пор, пока он не потеряет информативность. После этого выбираем наиболее информативный признак другого датчика и т.д. до конца работы алгоритма минимизации.

Побочный результат такого подхода может заключаться в том, что информативности имеющихся датчиков и признаков может оказаться недостаточно для распознавания всех состояний системы. В этом случае табл. 4 необ-

ходимо расширить путем добавления новых датчиков и признаков.

С точки зрения классического подхода к решению задачи, в нашем примере – минимизация таблицы «признаки – состояния» (см. табл. 4), все три ветви минимизации дадут равноценный результат.

Во всех трех вариантах для распознавания трех состояний системы достаточно двух признаков. Однако вариант минимизации, начинающийся с наиболее информативного признака датчика D_2 , позволяет обойтись только признаками этого датчика. Таким образом, предлагаемое решение задачи при прочих равных условиях и результатах позволяет обойтись одним датчиком вместо двух. При переходе от предсерийного или опытного образца к серийному производству это может дать существенную экономию.

Как видим на данном примере, сокращение избыточности датчиков, с выбором наиболее информативных из них, сокращает стоимость серийной АТ, повышает ее надежность, потому как точки присоединения датчиков к любой системе повышает риск отказов подобных соединений.

Отличительной чертой предлагаемого решения является то, что минимизация большой таблицы «признаки – состояния» ручными методами практически невозможна из-за существенно возросшей трудоемкости вычислений. Поэтому для практического применения приведенной методики необходима разработка про-

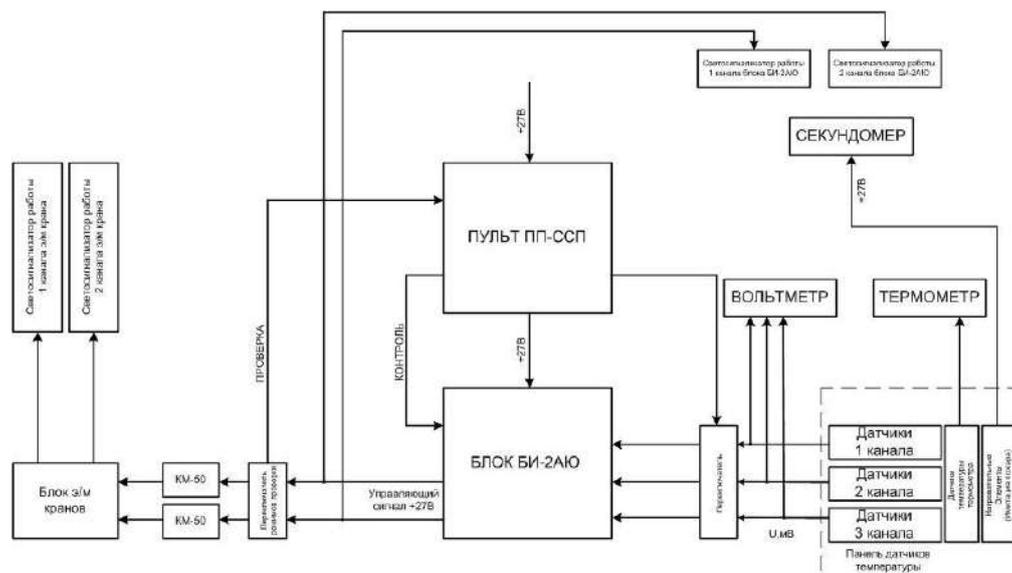


Рис. 2. Стенд по проверке противопожарной системы ССП-2А

Fig. 2. Stand for checking the fire protection system SSP-2A

граммного обеспечения, автоматизирующего минимизацию таблицы «признаки – состояния», что и является целью данной статьи.

Методика построения оптимального алгоритма поиска отказов на примере учебно-лабораторного стенда по проверке системы пожарной сигнализации ССП-2А

Для примера разработана методика построения алгоритма диагностирования для существующего стенда по проверке противопожарной системы ССП-2А. Задачей ставилась разработка оптимального алгоритма диагностирования построенного в виде дерева поиска отказов и примера технологической карты для ручного метода при отсутствии БАСК на борту любого объекта эксплуатации. В дальнейшем будет проведена проверка работоспособности модели путем установки конкретных наиболее информационных датчиков на данном стенде.

В качестве примера была выбрана структурная схема (рис. 2).

Построение функционально-логической модели

При построении логического устройства диагностируемой системы каждый конструктивный ее блок представляется логическими блоками, имеющими один выход.

Функционально-логическая модель системы сигнализации пожара состоит из 15 таких блоков (рис. 3) [25].

Построение таблицы «признаки – состояния»

Для разработки оптимальной программы

диагностирования необходимо построить таблицы истинности, или таблицы «признаки – состояния». Как пример приведена табл. 5, где «1» – возможности определения отказа блока, а «0» – обратное событие. Символами «П1–П15» обозначены проверки конкретных блоков системы. Символом S_1 обозначен отказ первого блока, S_2 – второго и т.д.

На первом шаге определяется количество информации, носимой каждой проверкой методом ведущей функции (1) [1, 2] путем перемножения количества «0» и «1» в каждой строке. Результаты расчетов приведены в последнем столбце табл. 5. Так, для проверки П8 имеется девять единиц и шесть нулей.

Оптимизация алгоритма поиска отказов

Выбираем как наиболее информативный тест $P_6 (S_6)$ и перестраиваем две наши подтаблицы так, чтобы в каждой из них слева были состояния, для которых P_6 дает «1», а справа «0». Теперь наша исходная таблица разбита на две подтаблицы (табл. 6).

На следующем шаге ведущая функция W вычисляется как сумма произведений «1» и «0» в каждой подтаблице по всей строке. Все тесты, кроме выбранных на первом и втором шаге $P_6(S_6)$, ранжируются в порядке убывания W .

Разбиение подтаблиц продолжается до тех пор, пока значения ведущей функции для всех проверок не будет равно «0».

Последовательность проверок, а именно программа поиска отказов, представлена в виде дерева поиска отказов (рис. 4).

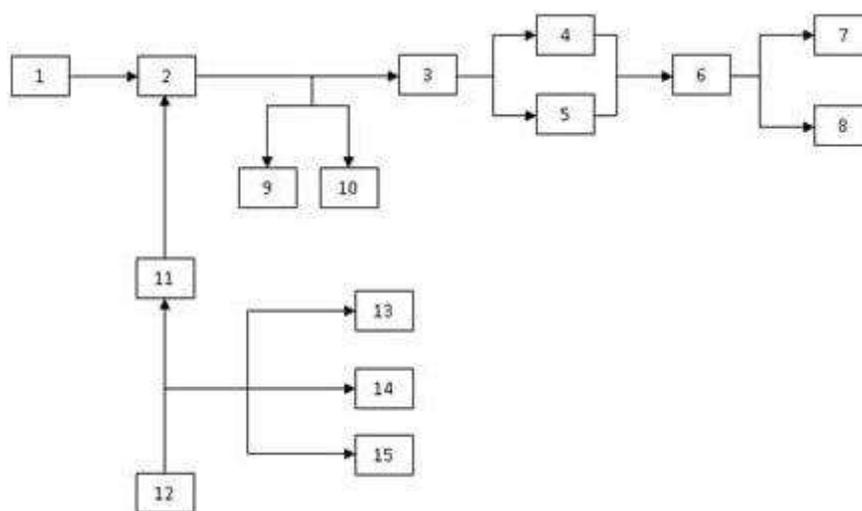


Рис. 3. Функционально-логическая модель системы сигнализации пожара
Fig. 3. Functional logical model of the system fire alarm

Таблица 5. Таблица вычислений значений ведущей функции по проверкам
Table 5. Table of calculations of the values of the master function by checks

№	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅	W
П ₁	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
П ₂	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	44
П ₃	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	50
П ₄	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	54
П ₅	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	54
П ₆	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	56
П ₇	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	54
П ₈	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	54
П ₉	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	50
П ₁₀	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	50
П ₁₁	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	36
П ₁₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	14
П ₁₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	26
П ₁₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	26
П ₁₅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	26

Таблица 6. Таблица вычислений значений ведущей функции на первом шаге минимизации
Table 6. Table of calculations of the values of the leading function at the first minimization step

№	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₁₁	S ₁₂	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅	W
П ₆	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
П ₁	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
П ₂	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	16
П ₃	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	15
П ₄	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	12
П ₅	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	12
П ₇	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	6
П ₈	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	6
П ₉	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	22
П ₁₀	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	22
П ₁₁	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	15
П ₁₂	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	7
П ₁₃	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	13
П ₁₄	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	13
П ₁₅	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	13

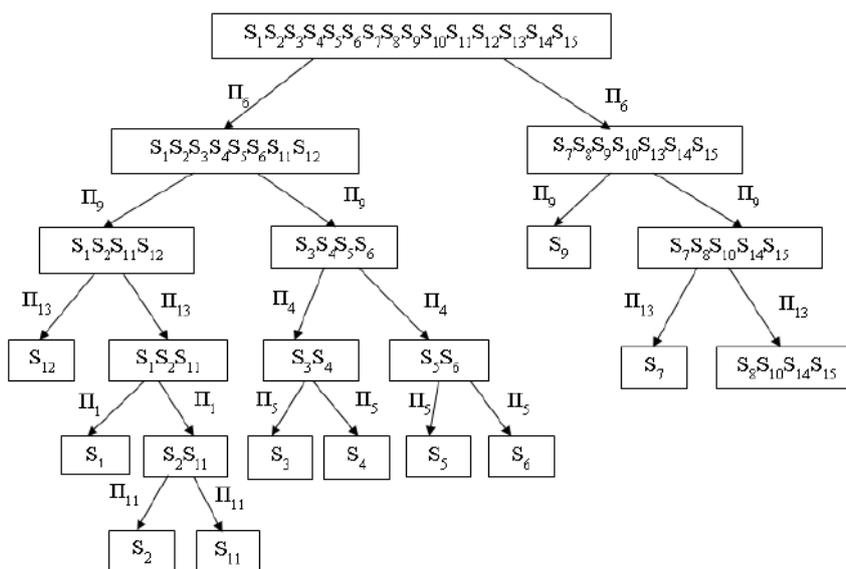


Рис. 4. Дерево поиска отказов
Fig. 4. Failure search tree

В работе также предусмотрено исключение визуально наблюдаемых отказов при проведении диагностирования или наиболее ненадежных блоков. Например, если не работает светосигнализатор S_7 , то однозначно в первую очередь необходимо проконтролировать его работоспособность, а не делать весь комплекс проверок.

В этом случае алгоритм оптимизации будет определяться следующим деревом поиска отказов или алгоритм поиска примет вид, как на рис. 5.

Проверка результатов

Результаты, полученные методом ведущей функции, целесообразно проверить информационным методом.

Для упрощения алгоритмов вычисления выбираем из табл. 5 наиболее информативные проверки. Такими проверками являются Π_3 , Π_6 , Π_7 . Проведем расчет количества информативно несущей последовательности для каждой проверки по формуле [1, 2]:

$$I_{\Pi_6} = \frac{8}{15} \log_2 \frac{8}{15} + \frac{7}{15} \log_2 \frac{7}{15} = 0,48 + 0,52 = 1;$$

$$I_{\Pi_7} = \frac{9}{15} \log_2 \frac{9}{15} + \frac{6}{15} \log_2 \frac{6}{15} = 0,44 + 0,53 = 0,97;$$

$$I_{\Pi_3} = \frac{5}{15} \log_2 \frac{5}{15} + \frac{10}{15} \log_2 \frac{10}{15} = 0,52 + 0,36 = 0,88.$$

На следующем шаге проводим расчет количества информативно несущей последовательности двух самых информативных проверок $\Pi_{6,2}$, $\Pi_{6,5}$, $\Pi_{6,9}$.

На основании выбора двойной проверки строим последовательность для трех самых информативных проверок $\Pi_{6,9,4}$, $\Pi_{6,9,8}$, $\Pi_{6,9,13}$.

Сравнительный анализ результатов вычислений методом ведущей функции и информативным методом показал идентичность результатов вычислений, что позволяет сделать вывод о верности диагностирования построенных оптимальных программ.

Для обучения методике поиска отказов в дискретных комбинационных устройствах разработана оригинальная программа Logika-2.

Разработка технологической карты поиска отказа

В случаях, если на борту объекта эксплуатации не предусмотрена установка БАСК или отсутствуют программные модули диагностирования отдельных систем, возможно, как один из вариантов, применение технологических карт поиска отказа. Упрощенный пример технологической карты приведен на рис. 6.

Разработанные усовершенствованные методики построения оптимальных программ диагностирования можно также использовать для эксплуатируемых объектов по имеющимся

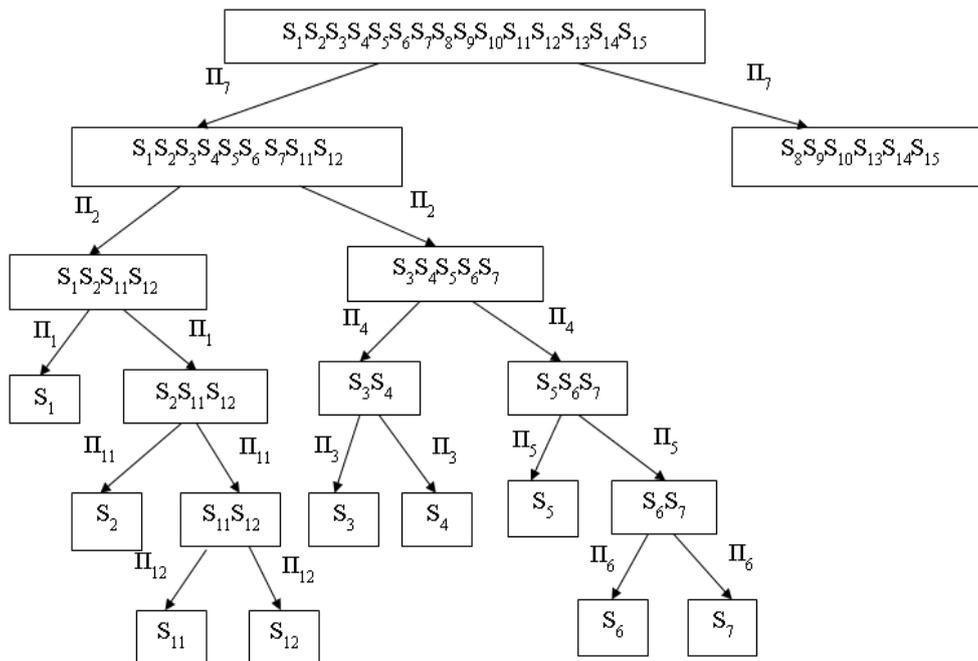


Рис. 5. Дерево поиска отказов при неработающем светосигнализаторе
Fig. 5. Failure search tree under non-working light signaling device

функциональным схемам для конкретных бортовых систем.

Таким образом, в работе предложен один из подходов диагностирования бортовых систем без дополнительных затрат на установку оборудования на находящиеся в эксплуатации ВС путем разработки специальных технологических карт по поиску отказов, или установки на борт ВС оптимального количества информационных датчиков, или введения предлагаемых в работе алгоритмов оптимального поиска отказов для бортовых систем контроля.

Методика поиска отказа элемента в блоке БИ-2АЮ

В настоящее время существует множество алгоритмов поиска неисправностей, которые подходят для современных бортовых автоматизированных систем контроля и диагностики.

Разработанный алгоритм поиска неисправностей также может быть использован для организации процесса диагностирования отдельных узлов на этапах проектирования испытаний и оптимизации количества датчиков рас-

познавания неисправностей. Это способствует снижению массогабаритных характеристик и стоимости проекта, повышает надежность бортовой системы управления.

Для того чтобы упростить анализ схемы, рекомендуется использовать стенд заземления системы с установленными необходимыми датчиками и счетчиками. После внесения в стенд соответствующих ошибок проводятся необходимые измерения для заполнения таблицы «признаки – состояния».

С этой целью предлагается разработать автономный блок в виде устройства, состоящего из платы, на которой расположены цифро-аналоговый и аналого-цифровой преобразователи. Для визуального представления результатов поиска неисправности и работы с прибором разработана программа сопряжения прибора с ноутбуком (рис. 7).

Для исследования системы была выбрана противопожарная система ССП-2А по причине того, что она является достаточно значимой с точки зрения безопасности полетов (см. рис. 2).

Такие алгоритмы разрабатываются в виде

Технологическая карта №1 Отказ противопожарной системы (признаки отказа: одновременно не горят два светосигнализатора S_2, S_{10} , на этапе тестового контроля)		
Содержание операции и технические требования	Признаки работоспособности	Примечания
1. В соответствии с деревом поиска отказов провести контроль работоспособности светосигнализатор S_2	а) В случае отказа сигнализатора – заменить б) В случае его работоспособности перейти к проверке сигнализатора S_{10}	
2. В соответствии с деревом поиска отказов перевести контроль работоспособности светосигнализатора S_{11}	а) В случае отказа сигнализатора – заменить б) В случае его работоспособности перейти к проверке работоспособности блока S_{10} (пульт ПП-ССП)	
3. В соответствии с деревом поиска провести контроль работоспособности S_2	а) В случае отказа блока S_1 (пульт ПП-ССП) заменить б) В случае его работоспособности перейти к проверке S_{10} (блок БИ-2АЮ)	Провести замер выходных сигналов согласно по принципиальной схеме
4. В соответствии с деревом поиска провести контроль работоспособности S	а) В случае отказа блока S_{10} (блок БИ-2АЮ) - заменить б) В случае его работоспособности перейти к проверке S_{10} (панель датчиков температуры)	Провести замер выходных сигналов принципиальной схеме
5. В соответствии с деревом поиска провести контроль работоспособности S	а) В случае отказа блока S_1 – заменить б) В случае его работоспособности изменить S_1 (переключатель)	Провести замер выходных сигналов согласно принципиальной схеме

Рис. 6. Технологическая карта поиска отказа

Fig. 6. Process flow chart for failure search

функционально-логической модели, дерева и блок-схем поиска неисправностей для выполнения оптимального количества операций по поиску неисправностей в системе [25].

Данный алгоритм позволит определять неисправности с глубиной поиска до съемных блоков, что недостаточно с учетом существующих трудностей получения новых блоков. Ремонт самого блока намного эффективнее. Необходимо разработать устройство для диагностирования отдельных блоков с глубиной поиска неисправностей вплоть до элемента. Это снижает трудозатраты на поиск неисправностей и повышает надежность управления.

Выполненные исследования показывают, что блок БИ-2АЮ является одним из наиболее значимых блоков, его неисправное состояние приводит к выходу из строя всей системы. Из анализа надежности элементов противопожарной системы ССП-2А следует, что он является наиболее ненадежным блоком.

Для осуществления работы алгоритма поиска неисправностей на ранних этапах была разработана блок-схема интерфейсного устройства диагностики блока БИ-2АЮ (рис. 7). Оператор управляет программой, которая установлена на персональный компьютер. Далее идет программное управление микроконтроллером. Микроконтроллер посылает тестовые сигналы на блок БИ-2АЮ через устройства связи и

управления. Выходной сигнал с блока через делитель напряжения, преобразующий напряжение 27 В в напряжение 5 В. Микроконтроллер отправляет выходные сигналы в виде кода на персональный компьютер для дальнейшего анализа результатов диагностики.

С помощью персонального компьютера в программе, разработанной в среде программирования Borland Builder C++ 6.0, осуществляется управление микроконтроллером.

Для проверки блока путем проведения испытаний выполнена таблица истинности по исправному состоянию и признакам отказавших элементов вплоть до обрывов в штепсельных разъемах. Примеры признаков отказов приведены в табл. 7 [25].

Для данного интерфейса принцип построения программы заключается в следующем: программа при своей загрузке подключает библиотеку mpusbapi.dll.

При подключении блока БИ-2АЮ через устройство сопряжения к ПЭВМ принцип диагностирования заключается в работе с программой, разработанной на языке программирования СИ⁺⁺.

При возникновении неисправности появляется код отличный от исправного состояния, например, который показан на рис. 8. При этом по таблице истинности распознается вид отказа.

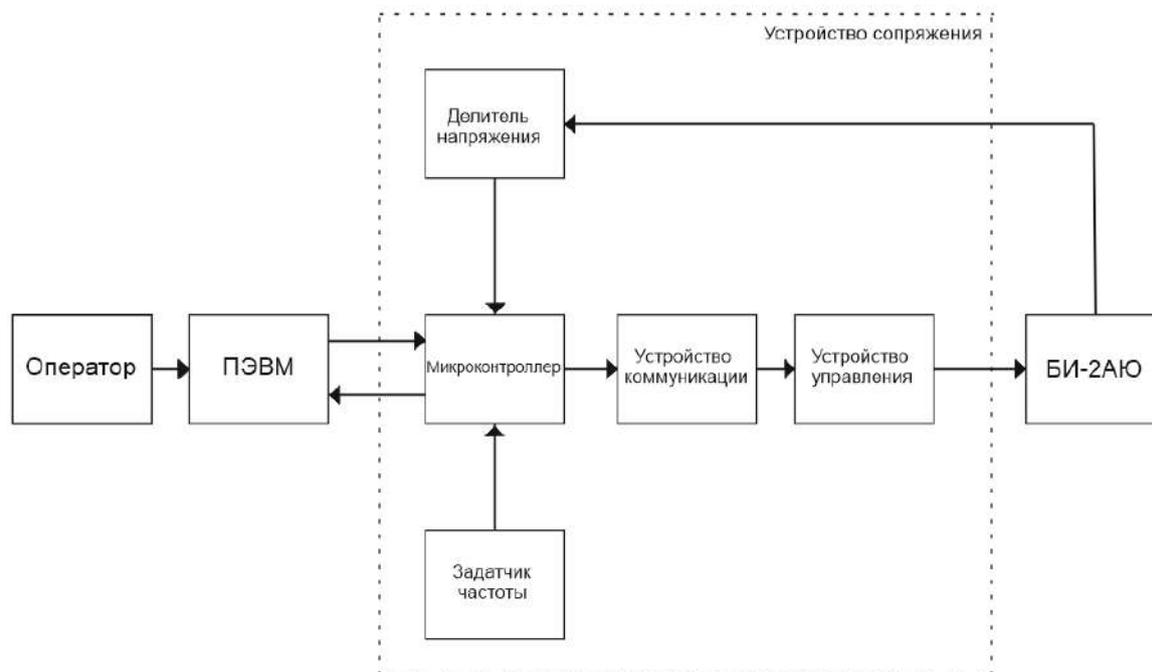


Рис. 7. Структурная схема устройства сопряжения
Fig. 7. Interface device schematic diagram

Таблица 7. Пример признаков отказов
 Table 7. Example of failure signs

Код отказа Failure code	Характеристика отказа Failure characteristic	Место отказа Failure location
111111111	Устройство исправно Device OK	–
011111111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin1
101111111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin2
110111111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin3
111011111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin4
111101111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin5
111110111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin6
111111011	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin7
111111101	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш4 pin1
111111110	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш4 pin2
111111110	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш4 pin3
001111111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш4 pin4
100111111	Неисправность элемента Element malfunction	R1
110011111	Неисправность элемента Element malfunction	R2
111001111	Неисправность элемента Element malfunction	R3
111100111	Неисправность элемента Element malfunction	R4
111110011	Неисправность элемента Element malfunction	R5
111111001	Неисправность элемента Element malfunction	R6
000111111	Неисправность элемента Element malfunction	P1

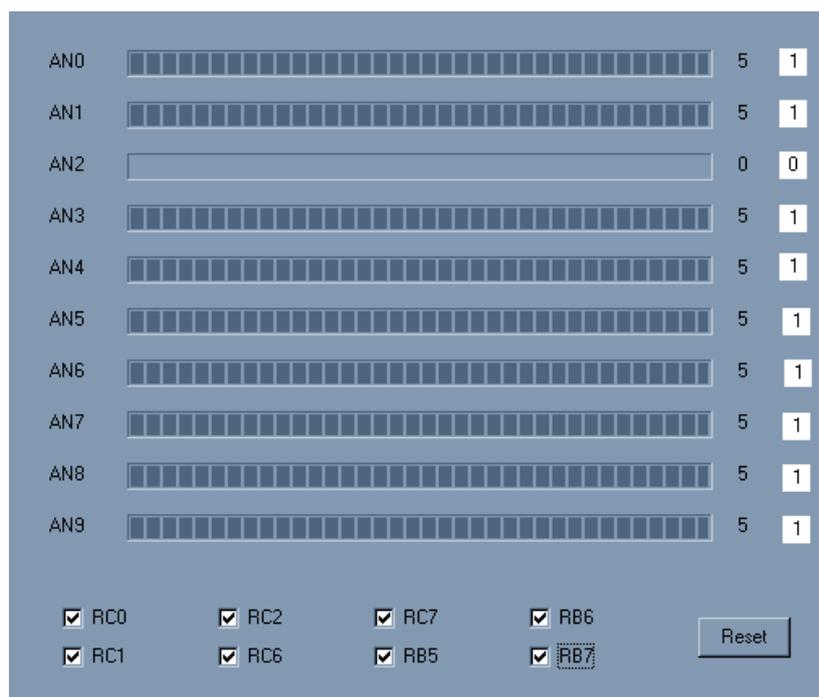


Рис. 8. Возникновение отказа при коде отличном от исправного состояния

Fig. 8. Failure occurring at a code other than serviceable condition

Заключение

В статье предложена методика и алгоритмы оптимизации диагностических тестов для поиска отказов в технической системе с глубокой поиска до съемного блока, а также методика поиска отказов непосредственно в блоках с глубиной поиска до элемента. Предлагаемая методика апробирована на конкретной системе ССП-2А и отдельном блоке этой системы БИ-2АЮ и может быть использована для различных систем и комплексов любых типов ВС.

В работе предусмотрено исключение визуально наблюдаемых отказов при диагностировании наиболее ненадежных блоков и трудоемкости по их проверке с учетом доступности на борту ВС.

Предложен один из подходов диагностирования технических систем без затрат для установки дополнительного оборудования на находящиеся в эксплуатации объекты (самолеты, поезда, теплоходы и т.д.) посредством разработки специальных технологических карт по

поиску отказов, установки оптимального количества информационных датчиков для спроектированных объектов эксплуатации или введения предлагаемых в работе алгоритмов оптимального поиска отказов для БАСК.

Сравнительный анализ результативных вычислений методом усовершенствованной ведущей функции и информативным методом [2] показал, что результаты вычислений идентичны. Это позволяет сделать вывод, что построенные оптимальные программы диагностированы верно.

Предложенные методика и устройство позволят значительно снизить затраты на приобретение и использование дорогостоящего оборудования, снизить трудозатраты на поиск отказов, проводить с достаточной достоверностью диагностику отдельных блоков, что может быть применено для любых блоков авиационного оборудования.

Список литературы

1. Инженерно-авиационная служба и эксплуатация авиационного оборудования / А.Е. Акиндеев, В.Д. Константинов, С.В. Крауз и др. М. : ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1970. 513 с.
2. Румянцев Е.А., Осовский В.П., Протопопов В.А. Инженерно-авиационное обеспечение боевых действий частей авиации вооруженных сил и эксплуатация авиационного оборудования. М. : ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1989. 397 с.
3. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования / В.Г. Воробьев, В.В. Глухов, Ю.В. Козлов и др. М. : Транспорт. 1984. 191 с.

4. Воробьев В.Г. Техническая эксплуатация авиационного оборудования / В.Г. Воробьев, В.Д. Константинов, В.Г. Денисов и др. М. : Транспорт, 1990. 296 с.
5. Авиационные цифровые системы контроля и управления / О.А. Артюховский, С.Н. Беляшевский, Ю.И. Валов и др. Л. : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1976. 608 с.
6. Барзилович Е.Ю. Савенков М.В. Статистические методы оценки состояния авиационной техники. М. : Транспорт, 1987. 240 с.
7. Гуляев В.А., Чаплыга В.М., Кедровский И.В. Методы и средства обработки диагностической информации в реальном времени. Киев : Наукова думка, 1986. 219 с.
8. Диагностические комплексы систем автоматического самолетовождения / В.А. Игнатов, С.М. Паук, Г.Ф. Коначович и др. М. : Транспорт, 1975. 272 с.
9. Дмитренко И.Е. Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики. М. : Транспорт, 1986. 141 с.
10. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства). М. : Энергоиздат, 1981. 319 с.
11. Техническая эксплуатация летательных аппаратов / Н.Н. Смирнов, Н.И. Владимиров, Ж.С. Черненко и др. М. : Транспорт, 1990. 423 с.
12. Техническая эксплуатация летательных аппаратов / А.И. Пугачев, М.Л. Бураков, Н.Т. Домотенко и др. М. : Транспорт, 1969. 480 с.
13. Тоценко В.Г. Алгоритмы технического диагностирования дискретных устройств. М. : Радио и связь, 1985. 238 с.
14. Allan F.J., Kameda T., Toida S. An Approach to the Diagnosability Analysis of a System // IEEE Transactions on Computers. 1975. Vol. C-24, Is. 10. P. 1040–1042.
15. Barsi F., Grandoni F., Maestrini P. A Theory of diagnosability of digital systems // IEEE Transactions on Computers. 1976, Vol. C-25, Is. 6. P. 585–593.
16. Fujiwara H., Kinoshita K. Connections assignments for probabilistically diagnosable systems // IEEE Transactions on Computers. 1978. Vol. C-27, Is. 3. P. 280–283.
17. Fujiwara H., Kinoshita K. Some existence theorems for probabilistically diagnosable systems // IEEE Transactions on Computers. 1978. Vol. C-27, Is. 4. P. 379–384.
18. Kime C.R. An Abstract model for digital system diagnosis // IEEE Transactions on Computers. 1979. Vol. C-28, Is. 10. P. 754–767.
19. Mallela S., Masson G.M. Diagnosis without repair for hybrid fault situations // IEEE Transactions on Computers. 1980. C-29, Is. 6. P. 461–470.
20. Mallela S., Masson G.M. Diagnosable systems for intermittent faults // IEEE Transactions on Computers. 1978. C-27, Is. 6. P. 560–566.
21. Preparata F.P., Metzger G., Chien R.T. On the connection assignment problem of diagnosable systems // IEEE Transactions on Electronic Computers. 1967. Vol. EC-16, Is. 6. P. 848–854.
22. Russel J.D., Kime C.R. System Fault Diagnosis: Closure and Diagnosability with Repair // IEEE Transactions on Computers. 1975. Vol. C-24, Is. 11. P. 1078–1089.
23. Тихий И.И., Кашковский В.В. Испытания и эксплуатация авиационной техники. Ч. 1. Иркутск : ИВВАИУ, 2009. 308 с.
24. Устинов В.В., Журавлева В.Б. Разработка методики, алгоритма и программы диагностирования бортового оборудования летательных аппаратов на этапах проектирования и испытаний // Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации : сб. тр. V науч.-практ. конф. студентов и аспирантов. Иркутск, 2012. С. 46–51.
25. Устинов В.В., Кузаков О.Л. Методика диагностирования отдельных блоков авиационного оборудования с глубиной поиска отказа до элемента // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки : сб. тезисов докл. II Всерос. науч.-практ. конф. «Авиатор». Воронеж, 2015. С. 280–282.

References

1. Akindeev A.E., Konstantinov V.D., Krauz S.V., Romyantsev E.A., Sergeev N.P., Sindeev I.M. Inzhenerno-aviatsionnaya sluzhba i ekspluatatsiya aviatsionnogo oborudovaniya [Aviation Engineering Service and Operation of Aviation Equipment]. Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskii Publ., 1970. 513 p.
2. Romyantsev E.A., Osovskii V.P., Protopopov V.A. Inzhenerno-aviatsionnoe obespechenie boevykh deistvii chastei aviatsii vooruzhennykh sil i ekspluatatsiya aviatsionnogo oborudovaniya [Engineering and aviation support of combat operations of aviation units of the armed forces and operation of aviation equipment]. Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskii Publ., 1989. 397 p.
3. Vorob'ev V.G., Glukhov V.V., Kozlov Yu.V., Konstantinov V.D., Sindeev I.M. Diagnostirovanie i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya aviatsionnogo oborudovaniya [Diagnostics and forecasting of the technical condition of aviation equipment]. Moscow: Transport Publ., 1984. 191 p.
4. Vorob'ev, V.G., Konstantinov V.D., Denisov V.G., Kulikov G.A., Pal'chikh M.I. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya aviatsionnogo oborudovaniya [Technical operation of aviation equipment] M.: Transport, 1990. 296 p.
5. Artyukhovskii O.A., Belyashevskii S.N., Valov Yu.I., Grigor'ev N.I., Gal'perin M.I., Myasnikov V.A., Petrov V.P., Semenova N.M., Byushgens G.S., Sinilina O.V., Makhovikova G.A., Chistyakov S.F. Aviatsionnye tsifrovye sistemy kontrolya i upravleniya [Aviation digital control and management systems]. Leningrad: Mashinostroenie. Leningradskoe otdelenie Publ., 1976. 608 p.
6. Barzilovich E.Yu. Savenkov M.V. Statisticheskie metody otsenki sostoyaniya aviatsionnoi tekhniki [Statistical methods for assessing the state of aviation technology.] Moscow: Transport Publ., 1987. 240 p.
7. Gulyaev V.A., Chaplyga V. M., Kedrovskii I.V. Metody i sredstva obrabotki diagnosticheskoi informatsii v real'nom vremeni [Methods and means of processing diagnostic information in real time]. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 1986. 219 p.

8. Ignatov V.A., Pauk S.M., Konakhovich G.F., Efimov A.A., Konstantinovskii V.V., Chuprin V.M., Vlasov B.B. Diagnosticheskie komplekсы sistem avtomaticheskogo samoletovozhdeniya [Diagnostic complexes of automatic aircraft navigation systems]. Moscow: Transport Publ., 1975. 272 p.
9. Dmitrenko I.E. Tekhnicheskaya diagnostika i avtokontrol' sistem zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki [Technical diagnostics and automatic control of railway automation and remote control systems]. Moscow: Transport Publ., 1986. 141 p.
10. Parkhomenko P.P., Sogomonyan E.S. Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki (Optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya; apparaturnye sredstva) [Fundamentals of technical diagnostics: (Optimization of diagnostic algorithms; hardware)]. Moscow: Energoizdat Publ., 1981. 319 p.
11. Smirnov N.N., Vladimirov N.I., Chernenko Zh.S., Komarov A.A., Pugachev A.I., Chinyuchin Yu.M. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya letatel'nykh apparatov [Technical operation of aircraft]. Moscow: Transport Publ., 1990. 423 p.
12. Pugachev A.I., Burakov M.L., Domotenko N.T., Kravets A.S., Kurganovich V.G., Polyanichenko A.A., Smirnov N.N. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya letatel'nykh apparatov [Technical operation of aircraft]. Moscow: Transport Publ., 1969. 480 p.
13. Totsenko V. G. Algoritmy tekhnicheskogo diagnostirovaniya diskretnykh ustroystv [Algorithms for technical diagnostics of discrete devices]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1985. 238 p.
14. Allan F.J., Kameda T., Toida S. An Approach to the Diagnosability Analysis of a System. *IEEE Transactions on Computers*, 1975, vol. C-24, issue 10, pp. 1040–1042.
15. Barsi F., Grandoni F., Maestrini P. A Theory of diagnosability of digital systems. *IEEE Transactions on Computers*, 1976, vol. C-25, issue 6, pp. 585–593.
16. Fujiwara H., Kinoshita K. Connections assignments for probabilistically diagnosable systems. *IEEE Transactions on Computers*, 1978, vol. C-27, issue 3, pp. 280–283.
17. Fujiwara H., Kinoshita K. Some existence theorems for probabilistically diagnosable systems. *IEEE Transactions on Computers*, 1978, vol. C-27, issue 4, pp. 379–384.
18. Kime C.R. An Abstract model for digital system diagnosis. *IEEE Transactions on Computers*, 1979, vol. C-28, issue 10, pp. 754–767.
19. Mallela S., Masson G.M. Diagnosis without repair for hybrid fault situations. *IEEE Transactions on Computers*, 1980, vol. C-29, issue 6, pp. 461–470.
20. Mallela S., Masson G.M. Diagnosable systems for intermitten faults. *IEEE Transactions on Computers*, 1978, vol. C-27, issue 6, pp. 560–566.
21. Preparata F.P., Metze G., Chien R.T. On the connection assignment problem of diagnosable systems. *IEEE Transactions on Electronic Computers*, 1967, vol. EC-16, issue 6, pp. 848–854.
22. Russel J.D., Kime C.R. System Fault Diagnosis: Closure and Diagnosability with Repair. *IEEE Transactions on Computers*, 1975, vol. C-24, issue 11, pp. 1078–1089.
23. Tikhii I.I., Kashkovskii V.V. Ispytaniya i ekspluatatsiya aviatsionnoi tekhniki. Chast' 1 [Testing and operation of aviation equipment. Part 1]. Irkutsk: IVVAIU Publ., 2009. 308 p.
24. Ustinov V.V., Zhuravleva V.B. Razrabotka metodiki, algoritma i programmy diagnostirovaniya bortovogo oborudovaniya letatel'nykh apparatov na etapakh proyektirovaniya i ispytaniy [Development of a methodology, algorithm and program for diagnosing on-board equipment of aircraft at the stages of design and testing.]. *Sbornik trudov V Nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov «Aktual'nye problemy razvitiya aviatsionnoi tekhniki i metodov ee ekspluatatsii»* [Proceedings of the V Scientific and Practical Conference of students and Ph.D. students «Actual problems of the development of aviation technology and methods of its operation»]. Irkutsk, 2012, pp. 46–51.
25. Ustinov V.V., Kuzakov O.L. Metodika diagnostirovaniya otdel'nykh blokov aviatsionnogo oborudovaniya s glubinoi poiska otkaza do elementa. [A technique for diagnosing individual blocks of aviation equipment with a failure search depth to the element]. *Sbornik tezisev dokladov «Aktual'nye voprosy issledovaniy v avionike: teoriya, obsluzhivanie, razrabotki» II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aviator»* [Proceedings of abstracts «Topical issues of research in avionics: theory, maintenance, development» of the II All-Russian Scientific and Practical conference «Aviator»]. Voronezh, 2015, pp. 280–282.

Информация об авторах

Кашковский Виктор Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: viktor.kashkovskiy@mail.ru.

Устинов Владимир Валентинович, старший преподаватель кафедры авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Иркутск; e-mail: ustinov_1956n@mail.ru.

Чобанян Лусине Геворговна, кафедра авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Иркутск; e-mail: lusine.chobanyan@inbox.ru.

Information about the authors

Victor V. Kashkovskii, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: viktor.kashkovskiy@mail.ru.

Vladimir V. Ustinov, Assistant Professor of the Department of Aviation Electrical Systems and Pilot Navigation Systems, Irkutsk Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk; e-mail: ustinov_1956n@mail.ru.

Lusine G. Chobanyan, the Department of Aviation Electrical Systems and Pilot Navigation Systems, Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk; e-mail: lusine.chobanyan@inbox.ru.

Анализ статистики показателей дорожного травматизма за 2021 и 2022 гг. в Иркутском регионе

В.С. Асламова¹✉, А.А. Мелентьева¹, А.А. Асламов²

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

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

✉aslamovav@yandex.ru

Резюме

В статье по данным статистики Госавтоинспекции дан сопоставительный анализ суммарных показателей дорожно-транспортных происшествий на иркутских автомобильных дорогах за октябрь и ноябрь 2021 и 2022 гг. В 2022 г. наблюдается снижение основных показателей дорожного травматизма, в том числе и детского. Выявлены влияющие на травматизм факторы, причины и условия. Подтверждено, что динамика численности дорожно-транспортных происшествий и смертности носит сезонный характер. Из-за ненадлежащего состояния иркутских автодорог произошло 45,4 % происшествий. Показано, что в 2022 г. в регионе в дорожно-транспортных происшествиях с летальными исходами погибли: водители – 41,6 %, пассажиры – 30,6 %, пешеходы – 25,2 %. Существенно в 2022 г. возросло число происшествий, в которых погибли другие участники движения. В 2,3 раза вырос коэффициент тяжести по числу происшествий. Больше смертельных исходов в происшествиях было в апреле, мае и июле, пик смертности наблюдался в июле 2022 г. Однако за указанный период времени суммарное количество смертельных исходов в происшествиях (243 чел.) в 2022 г. по сравнению с 2021 г. уменьшилось в 1,16 раза, а суммарное число раненых сократилось в 2,31 раза и составило 1 193 чел. Пик числа происшествий (16,45 %) и раненых в них (17,8 %) приходится на субботу. Минимальное число смертельных исходов (9,1 %) в результате реализации происшествия в среду, но они имеют тяжелые последствия с коэффициентом тяжести 0,1434. Наибольшее число происшествий (26,6 %) реализуется с 17 до 21 ч., что объясняется ростом интенсивности движения транспортных средств по окончании рабочего дня и наступлением сумерек. Следует добавить, что в темное время дня совершается 29,8 % происшествий. Выявлены критические промежутки времени суток, в которые реализуются происшествия с тяжкими последствиями: с 2 до 3 ч (коэффициент тяжести 0,2667, в аналогичном периоде прошлого года равен 38,67 %), с 3 до 4 ч (коэффициент тяжести 0,280, в аналогичном периоде прошлого года равен 22,22 %) и с 5 до 6 ч (коэффициент тяжести 0,2727, в аналогичном периоде прошлого года равен 13,64 %). Происшествия с наездом на пешеходов составили 28,3 % от общего количества происшествий, из них 32,8 % происшествий произошло в темное время суток. В 43,9 % происшествий виновны сами пешеходы, в 54,9 % – водители машин. Наиболее значимыми видами реализации происшествий стали: столкновения транспортных средств (39,67 %), наезды на пешеходов (28,36 %). По сравнению с 2021 г. участились наезды на стоящее транспортное средство в 1,09 раз, на препятствие в 1,12 раз и увеличилось число происшествий на пешеходных переходах в 1,12 раз. Существенно снизилась техническая неисправность машин (в аналогичном периоде прошлого года этот показатель составлял 82,12 %). Главной причиной происшествий на иркутских дорогах остается нарушение водителями правил дорожного движения (83,4 %). Чаще правила нарушают водители легковых транспортных средств – 78,31 %, реже грузовых – 9,14 %, причем в состоянии опьянения находятся 14,4 и 8,97 % водителей соответственно.

Ключевые слова

дорожно-транспортное происшествие, значимые факторы, количественный анализ, суммарный показатель, Иркутская область

Для цитирования

Асламова В.С. Анализ статистики показателей дорожного травматизма за 2021 и 2022 гг. в Иркутском регионе / В.С. Асламова, А.А. Мелентьева, А.А. Асламов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 194–206. DOI 10.26731/1813-9108.2023.(77).194-206.

Информация о статье

поступила в редакцию: 26.01.2023 г.; поступила после рецензирования: 7.03.2023 г.; принята к публикации: 10.03.2023 г.

Analysis of traffic injury statistics for 2021 and 2022 in the Irkutsk region

V.S. Aslamova¹✉, A.A. Melent'eva¹, A.A. Aslamov²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

✉aslamovav@yandex.ru

Abstract

In the article, a comparative analysis of the total indicators of traffic accidents on the Irkutsk highways is given according to the

statistics of the State traffic inspectorate for 10 and 11 months of 2021 and 2022. In 2022, there is a decrease in the main indicators of road traffic injuries, including children. Factors, causes and conditions influencing traumatism are revealed. It is confirmed that the dynamics of the number of road accidents and deaths is seasonal. 45,4 % of accidents occurred due to the poor condition of the Irkutsk highways. It is shown that in 2022 on the Irkutsk highways, drivers die in 41,6 % of fatal accidents, passengers in 30,6 %, and pedestrians in 25,2 %. In 2022, the number of accidents with other traffic participants dead has increased significantly. The severity coefficient in terms of the number of incidents increased by 2,3 times. The largest number of deaths in accidents occurred in April, May and July. The peak of mortality was observed in July 2022. However, over the indicated period of time, the total number of deaths in accidents (243 people) in 2022 decreased by 1,16 times, and the total number of injured decreased by 2,31 times and decreased to 1 193 people. The peak of the number of incidents (16,45 %) and the number of people injured in them (17,8 %) falls on Saturday. The minimum number of deaths (9,1 %) as a result of the implementation of the incident on Wednesday, but they have severe consequences with a severity coefficient of 0,1434. The largest number of accidents (26,6 %) occurs from 17:00 to 21:00, which is explained by the increase in traffic intensity at the end of the working day and the onset of twilight. It should be added that 29,8 % of accidents occur during the hours of darkness. Critical time intervals of the day during which incidents with serious consequences occur: from 2 to 3 hours (severity coefficient is 0,2667, in the same period last year is –38,67%), from 3 to 4 hours (severity coefficient is 0,280, in the same period last year is –22,22 %) and from 5 to 6 hours (severity coefficient is 0,2727, the same period last year is 13,64 %). Pedestrian collisions accounted for 28,3 % of the total number of accidents, of which 32,8 % occurred at night. In 43,9 % of accidents, pedestrians themselves are guilty, in 54,9 % – drivers are. The most significant types of incidents were: vehicle collisions (39,67 %), pedestrian collisions (28,36 %). Compared to 2021, collisions have become more frequent: 1,09 times for a standing vehicle, 1,12 times for an obstacle, and 1,12 times for crossings. The technical malfunction of machines has significantly decreased (in the same period last year is –82,12 %). The main cause of accidents on the Irkutsk roads is the violation of traffic rules by drivers (83,4 % of accidents). Most often, the rules are violated by drivers of cars (78,31 %) and trucks (9,14 %). Moreover, 14,4 % and 8,97 % of the drivers respectively were in a state of intoxication.

Keywords

road traffic accident, significant factors, quantitative analysis, total indicator, Irkutsk region

For citation

Aslamova V.S., Melent'eva A.A., Aslamov A.A. Analiz statistiki pokazatelei dorozhnogo travmatizma za 2021 i 2022 gg. v Irkutskom regione [Analysis of traffic injury statistics for 2021 and 2022 in the Irkutsk region]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 194–206. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).194-206.

Article info

Received: January 26, 2023; Revised: March 7, 2023; Accepted: March 10, 2023.

Актуальность исследования

В современном обществе невозможна жизнь без автотранспортного движения. Стремительная автомобилизация населения не только усложняет дорожную ситуацию, но и влияет на численность дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Последствия ДТП – огромные социальные, человеческие и финансовые издержки. Поэтому обеспечение безопасности на автодорогах это не только российская, но и мировая проблема, так как для большинства стран они составляют примерно 3 % их валового внутреннего продукта [1, 2].

Для безопасного автодорожного движения нужен непрерывный мониторинг показателей ДТП, позволяющий выявить главные причины реализации аварийных ситуаций. Проведение системного анализа данных статистики по ДТП позволит путем разработки адекватных мер предупредить и/или сократить их количество в дальнейшем [2–8].

В настоящее время наблюдается сниже-

ние основных показателей ДТП, но до сих пор нерешенной проблемой российского общества являются ДТП с участием несовершеннолетних [9–13].

Целью работы является анализ статистических данных Госавтоинспекции [14] за 2021 и 2022 гг. и выявление значимых причин и факторов ДТП в Иркутской области (ИО).

Анализ факторов, причин и показателей травматизма дорожно-транспортных происшествий

Абсолютные показатели дают возможность судить об уровне аварийности в ИО, выполнять сравнительный анализ в выбранном промежутке времени и показывать тенденции изменения этого уровня [15]. Статистические данные о ДТП [14] подвергались анализу в MS Excel.

В табл. 1 приведены значения абсолютных (за ноябрь 2022 г.) и аналогичных прошлогодних показателей (АППГ) ДТП в ИО.

Таблица 1. Сравнение показателей дорожно-транспортных происшествий в Иркутской области за ноябрь 2021 и 2022 гг.

Table 1. Comparison of indicators of road traffic accidents in the Irkutsk region for November 2021 and 2022

Наименование показателя Indicator name	Абсолютная величина / АППГ, % Absolute value / similar previous year indicators, %		
	Дорожно-транспортные Происшествия, всего	Раненые	Погибшие
Дорожно-транспортные происшествия Traffic accidents	184 / -11,5	226 / -6,2	24 / -29,4
Пострадавшие, из них Victims, of which pedestrians	64 / -3,0	59 / -54,7	5 / -100
дети до 16 лет children under 16	22 / -21,4	24 / -25,0	0
дети до 18 лет children under 18	32 / 0	35 / -5,4	0
Водители транспортных средств из-за нарушения правил дорожного движения Drivers due to traffic violations	161 / -12,5	206 / -8,0	20 / -23,1
При выезде транспортных средств на встречную полосу (с 1 января 2022 г.) Vehicles entering the oncoming lane (since January 1, 2022)	11	25	2
Дорожно-транспортные происшествия в населенных пунктах Traffic accidents in settlements	131 / -6,4	163 / 4,5	11 / -26,7
На автодорогах общего пользования On public roads	184 / -11,5	226 / -6,2	24 / -29,4
Дорожно-транспортные происшествия вне населенных пунктов и городов (с 1 января 2022 г.) Traffic accidents outside towns and cities	53	63	13
Дорожно-транспортные происшествия на железнодорожных переездах Traffic accidents at railway crossings	1	0	1
Транспортное средство скрылось с места происшествия The vehicle fled the scene	16 / -20,0	16 / -5,9	0 / -100
Водитель скрылся с места дорожно-транспортного происшествия The driver fled the scene of the traffic accidents	4 / -50,0	3 / -72,7	1 / 0
С фото- и видеофиксацией нарушения правил дорожного движения (с 1 января 2022 г.) With photo and video recording of traffic violations (from January 1, 2022)	1	2	0
Неустановленное транспортное средство Unidentified vehicle	9 / 80,0	9 / 125,0	0 / -100

Из табл. 1 видно, что в ноябре 2022 г. выросло число раненых в населенных пунктах и в ДТП с неустановленным транспортным средством (ТС).

Для определения тяжести определенного вида ДТП воспользуемся коэффициентом тяжести (КТ) ДТП, равным отношению числа погибших в ДТП людей n_c к числу раненых n_r за определенный календарный срок (десять месяцев) [15]: $КТ = n_c / n_r$. Такой количественный

анализ ДТП может служить для определения причинно-следственных факторов реализации ДТП и степени влияния этих факторов на ДТП (табл. 2).

Как видно из табл. 2 максимум погибших в ДТП: водители – 41,6 %; пассажиры – 31,7 %; пешеходы – 25,7 %. Существенно в 2022 г. выросло число ДТП, в которых погибли другие участники движения. В 2,3 раза вырос в 2022 г. КТ по числу ДТП.

В работах [5, 16] продемонстрирована сезонная динамика показателей ДТП. На рис. 1 приводится динамика суммарного за 11 месяцев числа ДТП d в 2021 и 2022 гг. в зависимости от месяца.

Пик численности ДТП в 2022 г. пришелся на август, в 2021 г. – на октябрь.

На рис. 2 показана динамика суммарных за 11 месяцев смертельных исходов в ДТП. В 2022 г. по сравнению с АППГ больше смертельных исходов при ДТП было в апреле, мае и июле. Пик смертности в ДТП наблюдался в июле 2022 г. Однако за указанный период суммарное количество смертельных исходов в ДТП (243 чел.) в 2022 г. уменьшилось в 1,16 раза, а суммарное число раненых в ДТП сокра-

тилось в 2,31 раза и составило 1 193 чел.

На рис. 3 показано распределение суммарной за 10 месяцев численности ДТП d по дням недели. Просматривается положительная динамика снижения числа ДТП d в 2022 г. Пик в 2022 г. (16,45 %) приходится на субботу, в 2021 г. – на пятницу. Большого всего раненых (17,8 %) в ДТП также в субботу. Минимальное число смертельных исходов (9,1 %) в результате реализации ДТП в среду. Однако значение КТ самое высокое для среды 0,1434 (АППГ = – 1,05 %).

Распределение реализации ДТП по часам в сутках представлено на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что в 2022 г. наибольшее число ДТП (26,6 %) реализуется с 17 до 21 ч, что

Таблица 2. Градация суммарного числа дорожных происшествий d за десять месяцев в зависимости от категории пострадавших

Table 2. Gradation of the total number of road accidents d for 10 months, depending on the category of victims

Категория пострадавших Category of victims	2021	2022	АППГ, % similar previous year indicators
	Число происшествий / % Accident number / %	Число происшествий / % Accident number / %	
Водители Drivers	952 / 40,36	925 / 41,61	–0,03
Пассажиры Passengers	747 / 31,67	680 / 30,59	–0,09
Пешеходы Pedestrians	606 / 25,69	561 / 25,24	–0,07
Велосипедисты Cyclists	46 / 1,95	43 / 1,93	–0,07
Другие участники движения Other traffic participants	6 / 0,25	11 / 0,49	–0,83
С особо тяжелым исходом Particularly severe consequences	2 / 0,08	3 / 0,13	–0,50
Коэффициент тяжести по числу дорожно-транспортных происшествий Severity ratio by number of traffic accidents	0,1035	0,2378	129,80

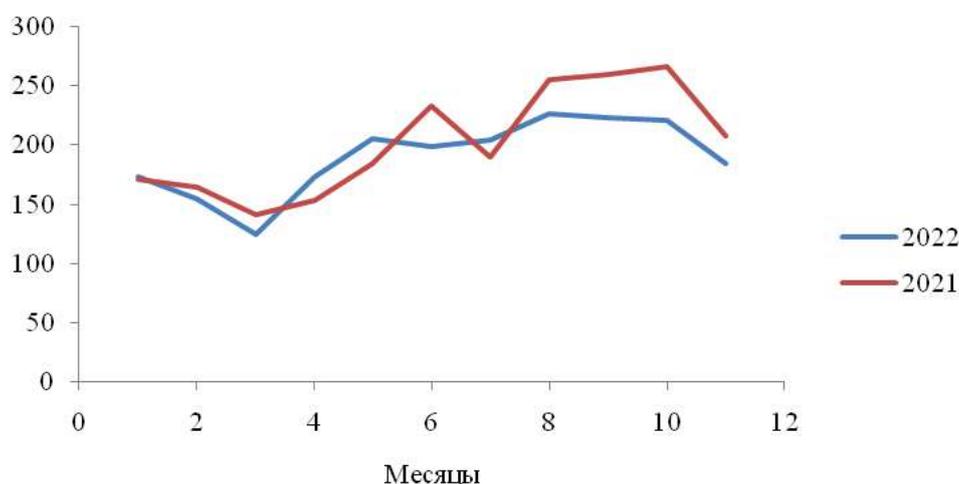


Рис. 1. Динамика суммарного числа дорожно-транспортных происшествий за 11 месяцев в 2021 и 2022 гг.

Fig. 1. Dynamics of the total number of accidents for 11 months in 2021 and 2022

объясняется ростом интенсивности движения ТС по окончании рабочего дня и наступлением сумерек [2]. Следует добавить, что в темное время суток совершается 29,8 % ДТП, КТ = 0,1813 (АППГ –2,91 %).

Критические промежутки времени суток, в которые реализуются ДТП с тяжкими последствиями: с 2 до 3 ч (КТ = 0,2667, АППГ = –38,67 %); с 3 до 4 ч (КТ = 0,280, АППГ = –

22,22 %); с 5 до 6 ч (КТ = 0,2727, АППГ = 13,64 %).

Распределение d_c по категориям пострадавших в результате ДТП показано на рис. 5.

Из рис. 5 просматривается устойчивая динамика снижения числа ДТП в 2022 г. Наиболее уязвимыми группами пострадавших являются: водители ТС (46,7 %), их пассажиры (30,6 %) и пешеходы (25,3 %) (проценты рас-

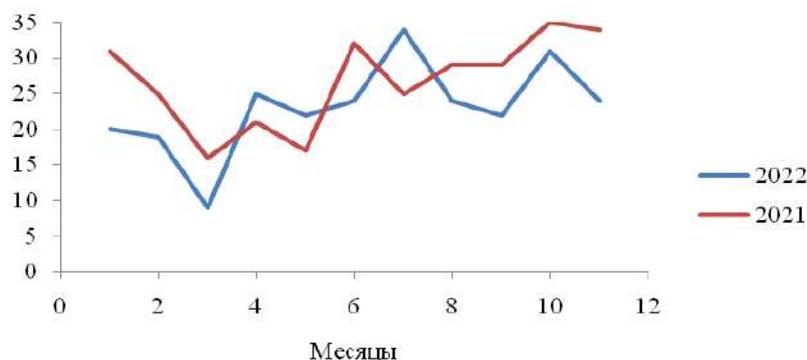


Рис. 2. Динамика суммарного числа смертельных исходов в дорожно-транспортных происшествиях за 11 месяцев в 2021 и 2022 гг.

Fig. 2. Dynamics of the total number of deaths in road accidents for 11 months in 2021 and 2022

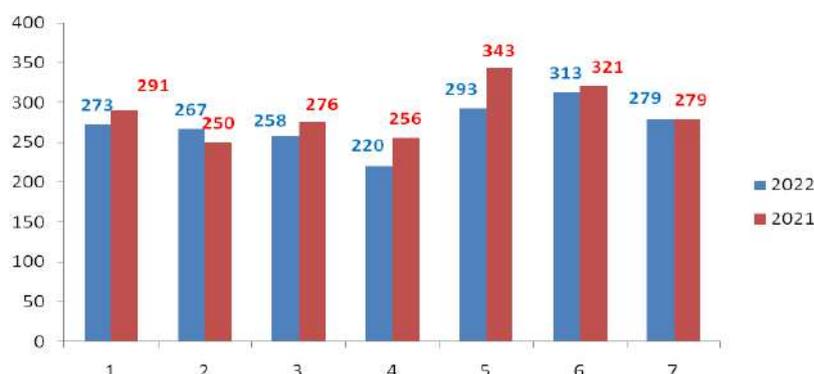


Рис. 3. Распределение суммарной численности дорожно-транспортных происшествий d по дням недели за 10 месяцев в 2021 и 2022 гг.

Fig. 3. Distribution of the total number of road accidents d by days of the week for 10 months in 2021 and 2022

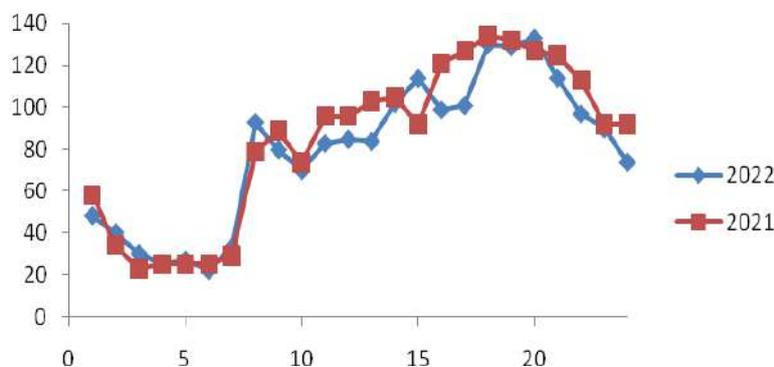


Рис. 4. Распределение суммарного числа транспортных происшествий по часам в сутках в 2021 и 2022 гг.

Fig. 4. Distribution of the total number traffic accidents by time of day in 2021 and 2022

считаны для 2022 г.). Что касается велосипедистов (2,33 %), то для них характерны самые тяжелые последствия ДТП (КТ = 0,1163, АППГ = 167,44 %).

В 2022 г. ДТП с наездом на пешеходов составляют 28,3 % от общего количества всех ДТП, из них 32,8 % произошло в темное время суток. В 43,9 % ДТП виновны сами пешеходы, в 54,9 % – водители ТС. В табл. 3 даны сведения о месте реализации, пострадавших и виновных в ДТП, в которых пострадали пешеходы.

В табл. 4 дана градация ДТП по видам.

Часто наезды ТС на пешеходов происходят из-за отсутствия на одежде потерпевших световозвращающих элементов (33,2 % случаев). Ранее указанный признак не учитывался

при расследовании ДТП. Практически 78,8 % наездов были совершены на первой полосе движения.

Из табл. 4 видно, что наиболее значимыми видами реализации ДТП в 2022 г. стали столкновения ТС (39,67 %) и наезды на пешеходов (28,36 %). Аналогичная градация видов ДТП была и в 2021 г. По сравнению с 2021 г. участились наезды на стоящее ТС в 1,09 раз, на препятствие в 1,12 раз и число ДТП на переходах – в 1,12 раз. Существенно (в 82,12 раз) снизилась техническая неисправность ТС – с 348 до 4. Причем на автодорогах общего пользования с неблагоприятными дорожными условиями (НДУ) погибло в 2 раза больше людей (21 чел., АППГ = 75,0 %), чем на автодорогах с НДУ в населенных пунктах и городах. Из-за НДУ произошло 45,40 % ДТП.

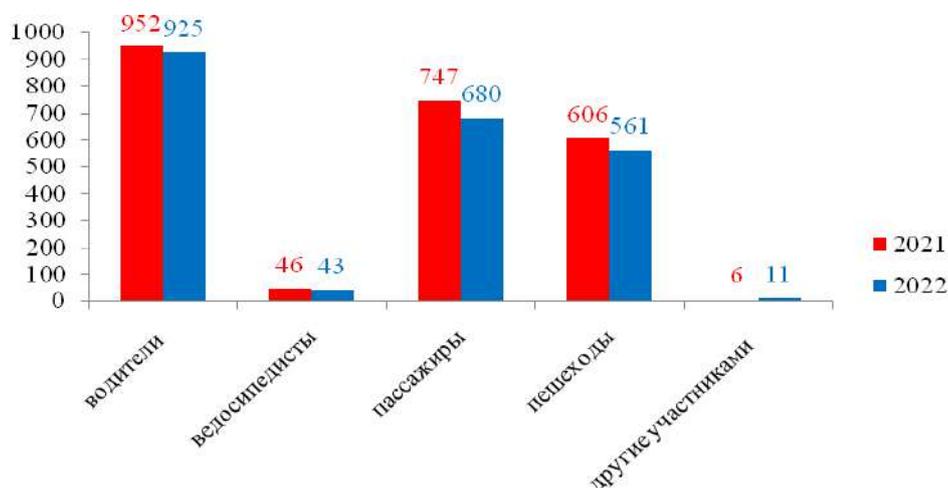


Рис. 5. Распределение суммарного числа дорожно-транспортных происшествий d по категориям пострадавших в 2021 и 2022 гг.

Fig. 5. Distribution of the total number road traffic accidents d by category of victims in 2021 and 2022

Таблица 3. Суммарные показатели дорожных происшествий с наездом на пешеходов
Table 3. Total indicators of traffic accidents involving pedestrians

Наименование показателя Name of indicator	2022	АППГ, % similar previous year indicators, %
d	561	-7,43
Количество раненых, чел. Number of wounded, pers.	534	-6,81
Число погибших, чел. The number of deaths, pers.	49	-18,33
Наезд на пешеходов Pedestrian collision	539	-8,95
по вине водителей due to drivers	308	-16,53
по вине пешеходов due to pedestrians	246	-0,81
в темное время суток in the dark	184	-4,66
в первой полосе движения in the first lane	425	-8,80
во второй полосе движения in the second lane	96	-1,03
в третьей полосе движения in the third lane	5	-58,33
в четвертой полосе движения in the fourth lane	5	-50,0
без световозвращающих элементов without reflective elements	179	-

Таблица 4. Градация автодорожных происшествий по видам и местам их реализации
Table 4. Gradation of road accidents by types and places of their implementation

Вид дорожно-транспортных происшествий Type of traffic accidents	<i>d</i> / %	Аналогичный показатель прошлого года, % Similar previous year indicator, %
Столкновения транспортных средств Vehicle Collisions	755/39,7	-5,98
Опрокидывание транспортных средств Rollover of vehicles	75/3,94	-7,41
Наезд на стоящее транспортное средство Hitting a parked vehicle	80/4,20	2,56
Наезд на пешеходов Pedestrian collision	539/28,36	-8,95
Наезд на препятствие Hitting an obstacle	104/5,47	6,12
Наезд на велосипедистов Hitting cyclists	45/2,36	-4,26
Падения пассажиров Passenger falls	29/1,52	0,00
Наезд на животных Animal hitting	14/0,74	0,00
Съезд с дороги Road exit	248/13,03	-4,38
Иные виды дорожно-транспортных происшествий Other types of traffic accidents	14/0,74	0,00
На дорогах с неудовлетворительными дорожными условиями On roads with poor road conditions	864/45,40	-9,53
На пешеходных переходах At pedestrian crossings	165/8,67	5,77
В городах и населенных пунктах In cities and towns	748/38,31	-6,73
Техническая неисправность транспортных средств Technical malfunction of vehicles	4/0,21	-98,85

Сильное влияние НДУ автодорог на показатели ДТП отмечается в работах [2, 17].

Одна из главных целей анализа показателей ДТП – установление вины участников движения [15]. Главной причиной ДТП как на областных, так и на федеральных дорогах, остается нарушение водителями правил дорожного движения (ПДД) [2, 9, 17, 18]. В 2022 г. 83,4 % ДТП произошли из-за нарушения ПДД водителями ТС.

Известно, что одной из причин ДТП во всем мире является состояние опьянения водителя [2, 6, 9]. Суммарные значения их численности в зависимости от вида ТС приведены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что чаще всего ПДД нарушают водители легковых (78,31 %) и грузовых (9,14 %) ТС. Причем в состоянии опьянения находились 14,4 и 8,97 % водителей соответственно. В 2022 г. возросло число ДТП, вызванных нарушением ПДД водителями грузовых ТС как трезвыми, так и пьяными. При нарушении

ПДД в нетрезвом состоянии находились водители-собственники легковых машин (более 97 %) и мотоциклов (90 %). При нарушении ПДД водители мопедов, трамваев, троллейбусов и тракторов были трезвы. В 2,2 раза выросло число водителей, которые отказывались от прохождения медицинского освидетельствования. Следует заметить, что самые тяжелые последствия ДТП при нарушении ПДД водителем в наркотическом состоянии (КТ = 0,6471), что согласуется с выводами [2].

В предлагаемом пакете поправок к ПДД, разработанном Минтрансом, предложено увеличить размеры штрафов до 5 000 руб. за нарушение ПДД (проезд на красный светофор, превышение допустимой скорости ТС и для велосипедистов в состоянии опьянения) [20].

Беспокоит увеличение численности ДТП из-за нарушений ПДД водителями мопедов и приравненных к ним ТС (гироскутеров, электросамокатов, моноколес и т.д.), называемых

средствами индивидуальной мобильности (СИМ) [21].

В России разработаны проект нового ГОСТа и альтернативные поправки для СИМ [22, 23], в которых предполагалось, что на СИМ можно ездить лишь с 16 лет, имея права и исключительно по дорогам. Если водитель СИМ с двигателем более 250 Вт окажется пьян, то его лишат прав управления и остальными

ТС. Также занимаются разработкой дорожных знаков для СИМ [24].

На рис. 6 приведено число ДТП в зависимости от возраста водителей, которые нарушили ПДД.

Как следует из рис. 6, в 2022 г. произошел скачкообразный рост нарушений ПДД опытными водителями возрастом от 60 лет. В 63,6 % ДТП ПДД нарушали водители от 60 до 70 лет (АППГ

Таблица 5. Суммарная численность происшествий в результате нарушения правил дорожного движения водителем в зависимости от вида машины

Table 5. The total number of accidents as a result of traffic violations by the driver, depending on the type of car

Наименование показателя Indicator name	2022	АППГ, % Similar previous year indicator, %
Число дорожно-транспортных происшествий с нарушением правил дорожного движения Number of accidents with traffic violations	1 586	-11,35
Легковые транспортные средства, в том числе с пьяным водителем Light vehicles, including drunk driver	1 242 179	-12,47 -3,24
Грузовые транспортные средства, в том числе с пьяным водителем Cargo vehicles, including drunk driver	145 13	33,03 44,44
Автобусы, в том числе с пьяным водителем Buses, including those with a drunk driver	54 0	-3,57 -100
Мотоциклы, в том числе с пьяным водителем Motorcycles, including those with a drunk driver	93 25	-6,06 -13,89
Мопеды и приравненные к ним транспортные средства Mopeds and equivalent vehicles	19	5,56
Трамваи trolleys	3	0
Троллейбусы Trolleybuses	4	-20,0
Тракторы Tractors	2	-83,33

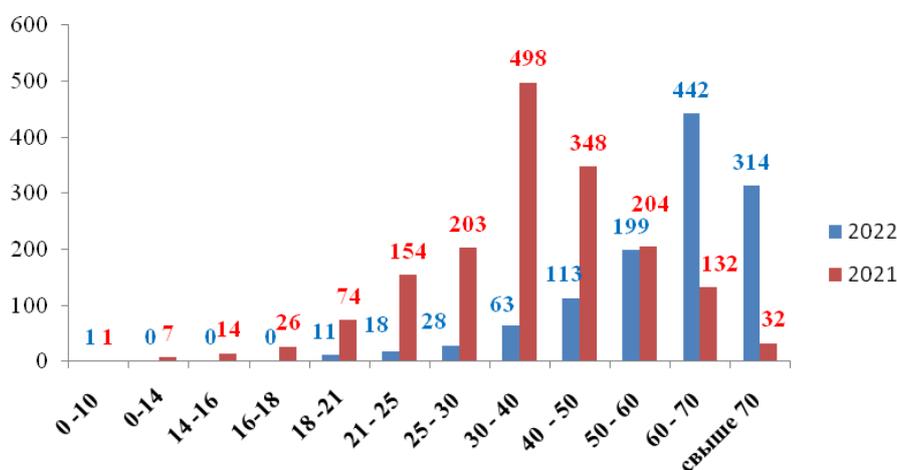


Рис. 6. Число происшествий в зависимости от возраста водителей, нарушивших правила автодорожного движения, в 2021 и 2022 гг.

Fig. 6. The number of accidents depending on the age of drivers who violated traffic rules in 2021 and 2022

= 234,85 %) и старше 70 лет (АППГ = 881,25 %). Этот факт объясняется тем, что такие водители более уверенно чувствуют себя за рулем, менее осторожны, что, как правило, приводит к ДТП. В 2021 г. в 50 % случаев ПДД нарушали водители от 30 до 50 лет.

На рис. 7 показано сопоставление численности ДТП со стажем управления водителями,

нарушивших ПДД в рассматриваемый период времени.

Из рис. 7 видно увеличение численности ДТП из-за нарушения ПДД водителями со стажем управления до 2 лет (АППГ = 30,93 %). В табл. 6 представлены пострадавшие при ДТП дети.

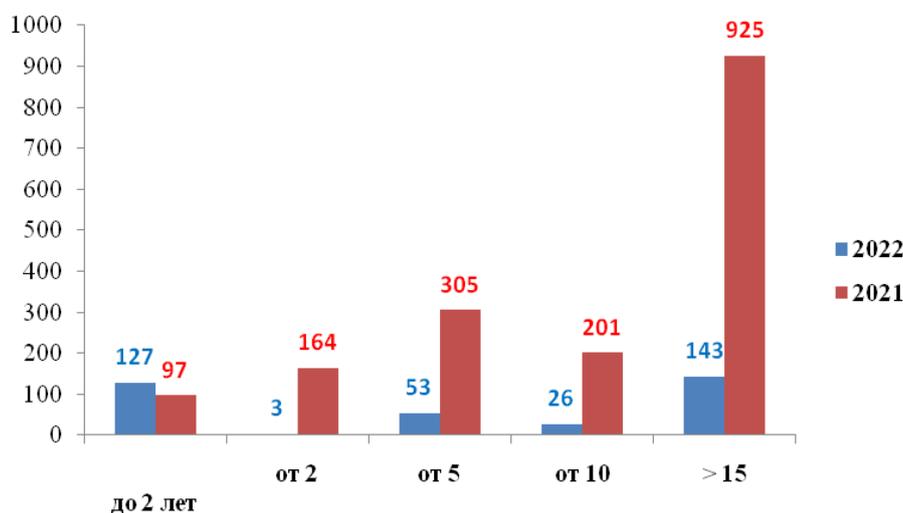


Рис. 7. Число дорожно-транспортных происшествий в зависимости от стажа водителя в 2021 и 2022 гг.

Fig. 7. Number of traffic accidents depending on driver experience in 2021 and 2022

Таблица 6. Дети, пострадавшие в дорожно-транспортных происшествиях в 2022 г.

Table 6. Children injured in road accidents in 2022

Пострадавшие affected	Погибло Died	АППГ, % Similar previous year indicator, %	Ранено Wounded	АППГ, % Similar previous year indicator, %
Дети до 16 лет children under 16	6	-45,4	267	-9,8
Дети-пассажиры child passengers	3	-57,1	105	-18,0
Дети до 12 лет children under 12	5	-100,0	37	-58,9
Дети без ремней и удерживающих устройств Children without belts or restraints	0	-100,0	16	-33,3
Дети-пешеходы pedestrian children	1	-66,7	115	-14,0
Дети-велосипедисты children cyclists	1	33,0	0	106,2
из них в результате нарушения правил дорожного движения водителями of which as a result of traffic rules violation by drivers	1	0	33	106,2
До 18 лет under 18	11	-31,0	362	-2,4
при нарушении правил дорожного движения водителями in case of traffic rules violation by drivers	9	-25,0	270	-10,0

По неосторожности детей, в том числе пешеходов, в 2022 г. выросло число ДТП. По неосторожности несовершеннолетних до 18 лет численность ДТП уменьшилась в 1,14 раз (до 238).

При расследовании ДТП в настоящее время ввели учет новых обстоятельств. Например, отдельно учитываются ДТП с детьми до 7 лет.

На рис. 9 представлена сравнительная гистограмма суммарной численности ДТП в зависимости от места его реализации. Видно, что ДТП чаще всего реализуются на дорогах общего пользования, а также в городах и населенных пунктах, из них в г. Иркутске – 46,5 % ДТП. На региональных дорогах происходит 18,9 % ДТП, на федеральных – 14,0 %.

Заключение

Анализируя полученные результаты можно заключить, что основные причины ДТП – низкие культура и дисциплина поведения всех участников автомобильного движения: водителей, пешеходов, пассажиров. Для снижения автомобильного травматизма предлагаются следующие первоочередные меры:

1. Разработать для детей специальное единое учебное пособие по ПДД с учетом их поведенческой психологии.

2. Организовывать проведение викторин, игр по изучению ПДД среди детей, студентов и других категорий населения.

3. Увеличить штрафы за перевозку детей без ремней безопасности и удерживающих устройств.

4. Увеличить штрафы за использование

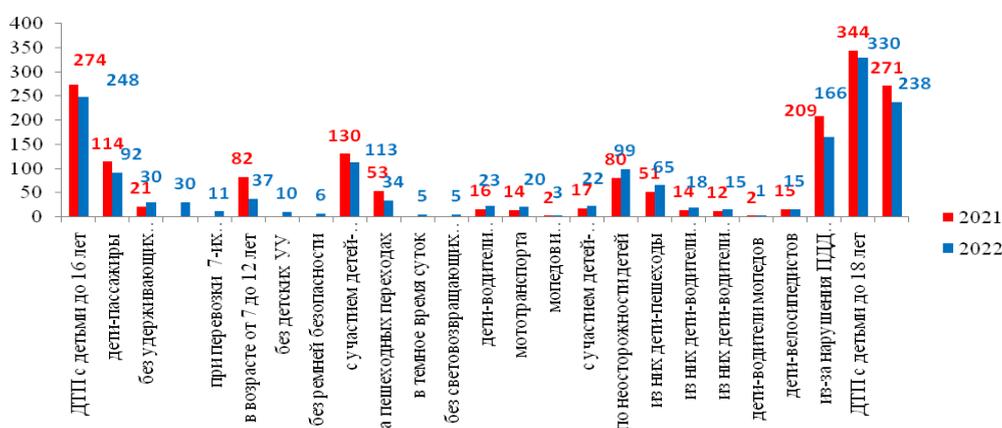


Рис. 8. Сравнительная гистограмма суммарной численности происшествий по их причинам и категориям пострадавших детей в 2021 и 2022 гг.

Fig. 8. Comparative histogram of the total number of incidents by their causes and categories of affected children in 2021 and 2022

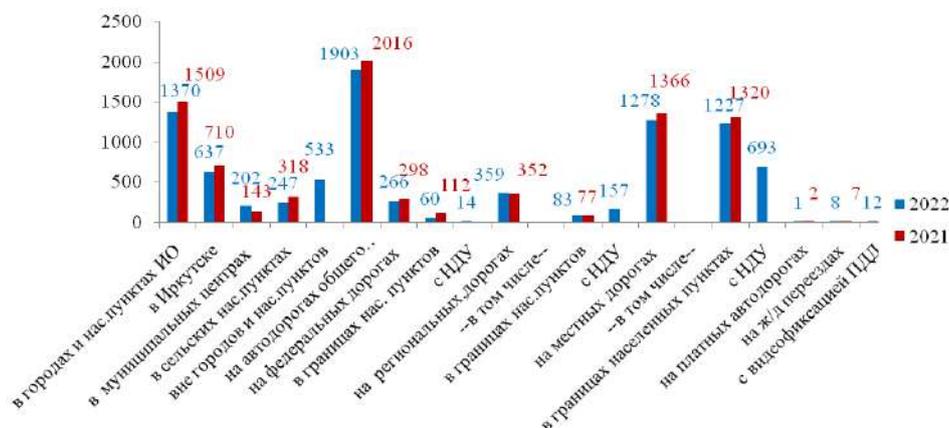


Рис. 9. Сравнительная гистограмма суммарной численности происшествий в зависимости от места их реализации в 2021 и 2022 гг.

Fig. 9. Comparative histogram of the total number of incidents depending on the place of their implementation in 2021 and 2022

технически неисправных автомашин, нарушение ПДД водителями, за управление ТС в наркотическом или в пьяном состоянии алкогольном опьянении вплоть до тюремного заключения, как это принято в Японии [25].

5. Оснастить каждый новый автомобиль:

– алкозамком – датчиком, автоматически блокирующим его на стоянке при наличии у водителя следов алкоголя;

– видеодатчиком сонливости, натягивающим ремень безопасности или производящим звуки для привлечения внимания водителя;

– системой, исключающей прямое столкновение ТС за счет регистрации расстояния между ТС и автоматического выбора нужной скорости движения [8].

6. Пропагандировать использование светоотражающих элементов на одежде подростков.

Список литературы

1. Николаева Р.В., Валиев Р.Ф. Безопасность дорожного движения, как мировая проблема // Техника и технология транспорта. 2022. № 3 (26). URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N26-03BDD322.pdf> (Дата обращения 20.10.2022).
2. Воротынова О.В. Исследование факторов, влияющих на безопасность движения на автомобильных дорогах // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее : сб. науч. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 40-летию создания Инженерно-строительного института. Красноярск, 2022. С. 14–18.
3. Хабибуллин Д.Р., Ильдарханов Р.Ф. Современные проблемы безопасности дорожного движения // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XII Национ. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Тюмень, 2019. Т. 2. С. 101–108.
4. Аземша С.А., Карасевич С. Н. Учет динамики аварийности при разработке мероприятий по повышению безопасности дорожного движения // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XII Национ. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Тюмень : Изд-во ТИУ, 2019. Т. 2. С. 8–14.
5. Асламова В.С., Кузнецова П.А., Асламов А.А. Сравнительный анализ дорожно-транспортных происшествий в Иркутской области и России // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2021. № 15. С. 127–130.
6. Пьянкова А.И., Фаттахов Т.А. Смертность от дорожно-транспортных происшествий в России: подходы к оценке, тенденции и перспективы // Демографическое обозрение. 2019. № 6 (3). С. 58–84.
7. Салахутдинов Ю.Р. Статистика факторов риска дорожно-транспортных происшествий в мире // За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества : сб. науч. ст. 3-й Всерос. молодеж. науч. конф. Курск, 2022. Т. 2. С. 273–276.
8. 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.
9. Прудникова А.Д., Симоненко Е.Ю., Литвинов А.В. Проблемы детского дорожно-транспортного травматизма в Российской Федерации // Проблемы и перспективы развития России: Молодежный взгляд в будущее : сб. науч. ст. 5-й Всерос. науч. конф. В 4 т. Курск, 2022. Т. 2. С. 164 – 167.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения // Госавтоинспекция : офиц. сайт Министерства внутренних дел Рос. Федерации. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения 20.10.2022).
15. Тяжесть последствий ДТП определение // Справочник водителя : сайт. URL: <https://ukstrela.com/tyazhest-posledstviy-dtp-opredelenie/> (Дата обращения 12.10.2022).
16. Паршина К.С., Печатнова Е.В. Снижение риска ДТП на основе анализа аварийности по месяцам года // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Томск : Изд-во ТПУ, 2017. С. 623–625.
17. Березин Н.А. Влияние неудовлетворительных дорожных условий на безопасность движения // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности: материалы IX Всерос. с междунар. участием науч.-техн. конф. молодых исследователей. Волгоград, 2022. С. 16–18.
18. Гончарук Д.В. Анализ статистики ДТП в России // За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества : сб. науч. ст. 3-й Всерос. молодеж. науч. конф. Курск, 2022. Т. 3. С. 187–190.
19. МВД назвало самые частые причины аварий в России // auto.ru журнал : сайт. URL: <https://mag.auto.ru/article/mvd-nazvalo-samye-chastye-prichiny-avariy-v-rossii/> (Дата обращения 18.10.2022).
20. В России подготовлены масштабные поправки в ПДД // auto.ru журнал : сайт.. URL: <https://mag.auto.ru/article/mintransannouncednewpdd/> (Дата обращения 18.11.2022).
21. Число аварий с электросамокатами в России выросло более чем вдвое // auto.ru журнал : сайт. URL: <https://mag.auto.ru/article/chislo-avariy-s-elektrosamokatami-vyroslo-bolee-chem-vdvoe/> (Дата обращения 18.10.2022).

22. В России разработали новый ГОСТ для электросамокатов // auto.ru журнал : сайт. URL: <https://mag.auto.ru/article/novyy-gost-vvodit-ogranicheniya-dlya-elektrosamokatov/> (Дата обращения 18.10.2022).
23. В России хотят ввести ограничение скорости для электросамокатов // auto.ru журнал : сайт. URL: <https://mag.auto.ru/article/evscooterrules/> (Дата обращения 18.10.2022).
24. В России готовят дорожные знаки для самокатов и моноколес // auto.ru журнал : сайт. URL: <https://mag.auto.ru/article/newroadplatesnov/> (Дата обращения 18.10.2022).
25. Квашиш В.Е. К проблеме культуры противодействия преступности // Вестн. Краснодар. ун-та МВД России. 2016. № 2 (32). С. 13–20.

References

1. Nikolaeva R.V., Valiev R.F. Bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya, kak mirovaya problema [Road safety as a global problem]. *Tekhnika i tekhnologiya transporta* [Technique and technology of transport], 2022, no. 3 (26). Available at: <http://transport-kgasu.ru/files/N26-03BDD322.pdf> (Accessed October 20, 2022).
2. Vorotynova O.V. Issledovanie faktorov, vliyayushchikh na bezopasnost' dvizheniya na avtomobil'nykh dorogakh [Study of factors affecting traffic safety on highways]. *Sbornik nauchnykh statei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 40-letiyu sozdaniya Inzhenerno-stroitel'nogo instituta «Aktual'nye voprosy stroitel'stva: vzglyad v budushchee»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 40th anniversary of the Civil Engineering Institute «Actual issues of construction: a look into the future»]. Krasnoyarsk, 2022, pp. 14–18.
3. Khabibullin D.R., Ildarkhanov R.F. Sovremennye problemy bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Modern problems of road safety]. *Materialy XII Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya». (V 2-kh tomakh)* [Proceedings of the XII National scientific and practical conference with international participation «Organization and road safety» (In 2 volumes)]. Tyumen, 2019, vol. 2, pp. 101–108.
4. Azemsha S.A., Karasevich S.N. Uchet dinamiki avariynosti pri razrabotke meropriyatii 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.
5. 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.
6. P'yankova A.I., Fattahov T.A. Smertnost' ot dorozhno-transportnykh proisshествii v Rossii: podkhody k otsenke, tendentsii i perspektivy [Mortality from road traffic accidents in Russia: approaches to assessment, trends and prospects]. *Demograficheskoe obozrenie* [Demographic Review], 2019, no. 6 (3), pp. 58–84.
7. Salakhutdinov Yu.R. Statistika faktorov riska dorozhno-transportnykh proisshествii v mire [Statistics of risk factors for road traffic accidents in the world]. *Sbornik nauchnykh statei 3-i Vserossiiskoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii «Za nami budushchee: vzglyad molodykh uchenykh na innovatsionnoe razvitie obshchestva»* [Proceedings of the 3rd All-Russian Youth Scientific Conference «The future is behind us: a view of young scientists on the innovative development of society»]. Kursk, 2022, vol. 2, pp. 273–276.
8. 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.
9. Prudnikova A.D., Simonenko E.Yu., Litvinov A.V. Problemy detskogo dorozhno-transportnogo travmatizma v Rossiiskoi Federatsii [Problems of children's road traffic injuries in the Russian Federation]. *Sbornik nauchnykh statei 5-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya Rossii: Molodezhnyi vzglyad v budushchee» (v 4-kh tomakh)* [Proceedings of the 5th All-Russian scientific conference «Problems and prospects for the development of Russia: Youth look into the future» (in 4 volumes)]. Kursk, 2022, vol. 2, pp. 164–167.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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-isspolnitel'noe pravo* [Criminal Executive Law], 2022, vol. 17, no. 1, pp. 85–90.
14. 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 October 20, 2022).

15. Tyazhest' posledstviy DTP opredeleniye (Elektronnyi resurs) [Severity of the consequences of an accident definition (Electronic resource)]. Available at: https://raex-rr.com/auto/car_accidents (Accessed October 12, 2022).

16. Parshina K.S., Pechatnova E.V. Snizhenie riska DTP na osnove analiza avariynosti po mesyatsam goda [Reducing the risk of road accidents based on the analysis of accidents by months of the year]. *Sbornik trudov Vserossiyskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Ekologiya i bezopasnost' v tekhnosfere: sovremennye problemy i puti resheniya»* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students «Ecology and safety in the technosphere: modern problems and solutions»]. Tomsk, 2017, pp. 623–625.

17. Berezin N.A. Vliyaniye neudovletvoritel'nykh dorozhnykh uslovii na bezopasnosti dvizheniya [Influence of unsatisfactory road conditions on traffic safety]. *Materialy IX Vserossiyskoi (s mezhdunarodnym uchastiyem) nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh issledovatelei «Aktual'nye problemy stroitel'stva, ZHKKH i tekhnosfernoi bezopasnosti»* [Proceedings of the IX All-Russian (with international participation) scientific and technical conference of young researchers «Actual problems of construction, housing and communal services and technospheric safety»]. Volgograd, 2022, pp. 16–18.

18. Goncharuk D.V. Analiz statistiki DTP v Rossii [Analysis of traffic accident statistics in Russia]. *Sbornik nauchnykh statei 3-i Vserossiyskoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii «Za nami budushchee: vzglyad molodykh uchenykh na innovatsionnoe razvitiye obshchestva» (v 3-kh tomakh)* [Proceedings of the 3rd All-Russian Youth Scientific Conference «The future is behind us: the view of young scientists on the innovative development of society» (in 3 volumes)]. Kursk, 2022, vol. 3, pp. 187–190.

19. MVD nazvalo samye chastye prichiny avarii v Rossii (Elektronnyi resurs) [The Ministry of Internal Affairs named the most frequent causes of accidents in Russia (Electronic resource)]. Available at: <https://mag.auto.ru/article/mvd-nazvalo-samyechastyepriчины-avarii-v-rossii/> (Accessed October 18, 2022).

20. V Rossii podgotovleny masshtabnye popravki v PDD (Elektronnyi resurs) [Large-scale amendments to traffic regulations have been prepared in Russia (Electronic resource)]. Available at: <https://mag.auto.ru/article/mintransannouncednewpdd/> (Accessed November 18, 2022).

21. Chislo avarii s elektrosamokatami v Rossii vyroslo bolee chem vdvoe (Elektronnyi resurs) [The number of accidents with electric scooters in Russia has more than doubled (Electronic resource)]. Available at: <https://mag.auto.ru/article/chislo-avariy-s-elektrosamokatami-vyroslo-bolee-chem-vdvoe/> (Accessed October 18, 2022).

22. V Rossii razrabotali novyi GOST dlya elektrosamokatov (Elektronnyi resurs) [Russia has developed a new state standard for electric scooters (Electronic resource)]. Available at: <https://mag.auto.ru/article/novyiy-gost-vvodit-ogranicheniya-dlya-elektrosamokatov/> (Accessed October 18, 2022).

23. V Rossii khotyat vvesti ogranichenie skorosti dlya elektrosamokatov (Elektronnyi resurs) [In Russia it wants to introduce a speed limit for electric scooters (Electronic resource)]. Available at: <https://mag.auto.ru/article/evscooterrules/> (Accessed October 18, 2022).

24. V Rossii gotovyat dorozhnye znaki dlya samokatov i monokolos (Elektronnyi resurs) [Road signs for scooters and monowheels are being prepared in Russia (Electronic resource)]. Available at: <https://mag.auto.ru/article/newroadplatesnov/> (Accessed October 18, 2022).

25. 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.

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.

Мелентьева Анастасия Александровна, магистрант кафедры техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: melentieva.1529@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.

Information about the authors

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

Anastasia A. Melent'eva, Master's student of Department of the Technosphere Safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: melentieva.1529@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.



МЕЛЬНИЧЕНКО ОЛЕГ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**Доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент Российской инженерной академии**

Олег Валерьевич Мельниченко родился в 1976 году в г. Нижнеудинск Иркутской области. После девятого класса средней школы поступил в ПТУ №7 на специальность «Помощник машиниста электровоза». В 1994 году, окончив с отличием училище и будучи увлеченным этой профессией, продолжил обучение в Иркутском институте инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Электрический транспорт (железнодорожный транспорт)». Учеба в ВУЗе и активное участие в студенческой жизни еще более подтвердили правильность выбора профессии. В 1999 году, окончив с красным дипломом институт, поступил в аспирантуру ИрИИТа. В те годы работал в НИЧ института инженером, затем – старшим научным сотрудником. После окончания аспирантуры трудился в должности заместителя декана электромеханического факультета, ассистента, старшего преподавателя кафедры «Электроподвижной состав».

В 2005 году в диссертационном совете Дальневосточного государственного университета путей сообщения успешно защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.22.07 на тему «Повышение энергетических показателей однофазно-постоянного тока с тиристорными выпрямителями». По результатам диссертационных исследований О.В. Мельниченко ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) выпустил сертифицированный тиристорный преобразователь, который был установлен на электровозе ЗЭС5К.

До 2006 года работал на кафедре «Электроподвижной состав» в должности старшего преподавателя, в 2007 году присвоено ученое звание доцента. С 2004 года по настоящее время является руководителем более 50 научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в сфере тягового подвижного состава, многие из которых внедрены в производство.

Научно-исследовательская и изобретательская деятельность направлена на повышение энергетических показателей, надёжности и эффективности работы электровозов переменного тока, диагностику электрического и электронного оборудования электровозов с тиристорными преобразователями, разработку новых ресурсосберегающих устройств и технологий в ремонте и эксплуатации тягового подвижного состава.

В 2012 году основал научную школу «Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения». С 2013 года является член-корреспондентом Российской инженерной академии, с этого же года - заведующим кафедрой «Электроподвижной состав». В 2014 году удостоен звания «Новатор ОАО «РЖД»». В 2015 году получил грант ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогической школы в области железнодорожного транспорта.

В 2015 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» на тему «Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока». В 2017 году О.В. Мельниченко присвоено учёное звание профессор.

Олег Валерьевич подготовил в качестве научного руководителя 10 кандидатов технических наук по научным специальностям: 05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» и 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы». Опубликовал более 350 научных трудов, 70 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, в

соавторстве имеется 80 патентов на изобретения и полезные модели, 15 учебно-методических изданий и др.

О.В. Мельниченко является членом Диссертационного совета 44.2.001.01 (Д 218.003.07), 2.9.3 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки), созданном на базе Дальневосточного государственного университета путей сообщения.

На сегодняшний день группой ученых ИрГУПС под руководством Мельниченко Олега Валерьевича решена проблема энергетических показателей современных отечественных электровазозов переменного тока. За заслуги в развитии науки, многолетний добросовестный труд, профессиональное мастерство Олег Валерьевич награжден различными почетными грамотами и благодарностями от Министерства транспорта РФ, ОАО «РЖД», Губернатора Иркутской области, ректора ИрГУПС и др.

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№ 1 (77)
2 0 2 3

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

Подписано в печать 26.04.2023. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 28.04.2023

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 28,48.

Уч.-изд. л. 19,96. Тираж 500 экз. Заказ № 3664

Подписной индекс по каталогу «Урал-Пресс»: 64556

ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН.

Сведения о журнале ежегодно

публикуются в международной справочной системе

по периодическим и продолжающимся изданиям

«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01

Маркировка информационной продукции - не маркируется

Цена свободная

Адрес редакции, издательства и типографии

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения

Телефон: +7(3952) 63-83-99, доб. 02-84, 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)