

**Главный редактор** А. М. Евстафьев, д-р техн. наук, профессор  
**Editor-in-chief** A. Evstafev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
**Заместитель главного редактора** А. К. Канаев, д-р техн. наук, профессор  
**Deputy chief editor** A. Kanayev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
**Научный редактор** Т. С. Титова, д-р техн. наук профессор  
**Scientific Editor** T. Titova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
**Перевод на английский язык** А. А. Лобанова  
**English translation** Anastasia A. Lobanova  
**Литературное редактирование и корректура** Н. В. Юдина  
**Editing and proofreading** Nadezhda V. Yudina  
**Верстка** И. Г. Иваньшина  
**Layout** Irina G. Ivanshina

#### Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

#### Издатель

Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Центр РИОР» по договору № ЭА94514 от 19.12.2022

#### Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

#### Publisher

Limited Liability Company "Publishing Center RIOR", under contract N ЭА94514 dated 19.12.2022

#### Контакты

190031, СПб., Московский пр., 9, тел. (812) 457-85-36;  
e-mail: brni@pgups.ru;

127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, оф. 402

#### Contacts

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 457-85-36;  
e-mail: brni@pgups.ru;

127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, office 402

#### Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ЭЛ № ФС 77-45490 от 22.06.2011 выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

#### Mass media registration certificate number

ЭЛ N ФС 77-45490 dd. 22.06.2011 issued by the The Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

#### The Journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI)

Журнал имеет институт рецензирования

#### The Journal has the Peer-review division

Журнал распространяется через Интернет без ограничений и по адресно-целевой подписке через редакцию

#### The Journal is distributed via Internet for free and by subscription via Editorial office

#### Минимальные системные требования

Тип компьютера, процессор, сопроцессор, частота: Pentium IV и выше; оперативная память (RAM): 256 Мб и выше; необходимо на винчестере: не менее 64 Мб; ОС MacOS, Windows (XP, Vista, 7); видеосистема: встроенная; дополнительное ПО: Adobe Reader версия от 7.X или аналог. Защита от незаконного распространения: реализуется встроенными средствами Adobe Acrobat

#### МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

##### INTERNATIONAL EDITORIAL

**Валинский Олег Сергеевич**, канд. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель Совета  
**Oleg Valinskiy**, PhD Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

**Хамидов Отабек Рустамович**, д-р техн. наук, доц., Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан  
**Otabek Khamidov**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Tashkent State Technical University, Tashkent, The Republic of Uzbekistan

**Вэйли Ли**, профессор, Институт электрических машин и приборов, Пекинский университет Цзяотун, Пекин, Китай  
**Weili Li**, PhD Degree and Professor, School of Electrical Engineering, Director of Institute of Electrical Machinery and Appliances, Beijing Jiaotong University, Beijing, China

**Ли Фуншэн**, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай  
**Li Fusheng**, PhD, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, China

**Поляк Милош**, профессор, Жилинский университет, Жилин, Словацкая Республика  
**Milos Poliak**, Ing. PhD, Professor, University of Zilina, Zilina, Slovak Republic

**Стыскала Витезслав**, профессор, Оставский технический университет, Острава, Чешская Республика  
**Vitezslav Styskala**, PhD, Associate Professor, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic

**Чжан Чжунъян**, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай  
**Zhang Zhongyang**, University Degree, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Professor, Secretary of the School of Locomotives and Rolling Stock, Zhengzhou, China

**Бельтюков Владимир Петрович**, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Vladimir Belyukov**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Блашко Людмила Сергеевна**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Liudmila Blazhko**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Бороненко Юрий Павлович**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Yuriy Boronenko**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Грачев Владимир Васильевич**, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Vladimir Grachev**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Грищенко Александр Васильевич**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Alexander Grishchenko**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Дудкин Евгений Павлович**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Evgeniy Dudkin**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Евстафьев Андрей Михайлович**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Andrey Evstafev**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Журавлева Наталья Александровна**, д-р экон. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Natalya Zhuravleva**, D. Econ. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Ким Константин Константинович**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Konstantin Kim**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Колпакчян Павел Григорьевич**, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Pavel Kolpakchyan**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Липидус Лариса Владимировна**, д-р экон. наук, профессор, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
**Larisa Lapidus**, D. Econ. Sci., Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**Никитин Александр Борисович**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Alexander Nikitin**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Никитин Виктор Валерьевич**, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Victor Nikitin**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Покровская Оксана Дмитриевна**, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Oksana Pokrovskaya**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Пудовиков Олег Евгеньевич**, д-р техн. наук, доц., РУТ, Москва, Россия  
**Oleg Pudovikov**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Russian University of Transport, Moscow, Russia

**Рачек Светлана Витальевна**, д-р экон. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия  
**Svetlana Rachek**, D. Econ. Sci., Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

**Титова Тамила Семеновна**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Tamila Titova**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Штыков Валерий Иванович**, член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия  
**Valerij Shtykov**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

# ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ, ПРЕДЛАГАЕМЫМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «БЮЛЛЕТЕНЬ РУЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»

## ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

1.1 Тема и содержание представляемой для публикации статьи должны соответствовать профилю журнала, обладать научной новизной и представлять интерес для специалистов.

1.2 Статьи, ранее опубликованные или переданные в другие издания, в журнал не принимаются.

1.3 Результаты исследований должны соответствовать одному из научных направлений: Транспортные системы, Энергетика и электротехника, Экономика.

1.4 Нижеперечисленные материалы предоставляются в электронном виде в одном архивном файле (zip или rar):

**Файл 1** – рукопись научной статьи в формате MS Word.

**Файл 2** – первая страница рукописи, подписанная автором (авторами).

**Файл 3** – согласие на обработку персональных данных, заверенное личной подписью, в сканированном виде.

**Файл 4** – информация об авторах:

- ФИО полностью,
- дата рождения,
- место работы, должность,
- ученая степень и звание,
- паспортные данные (серия, номер, кем и когда выдан),
- e-mail, телефон,
- адрес.

**Файл 5** – название статьи, аннотация, ключевые слова, библиографический список на английском языке в формате MS Word.

**Файл 6** – экспертное заключение о возможности опубликования рукописи в открытом доступе, заверенное по месту обучения или работы, в сканированном виде.

**Файл 7** – рецензия научного руководителя (для студентов-исследователей, магистров, аспирантов и соискателей ученых степеней).

**Файл 8** – лицензионный договор.

1.5 Все рукописи проходят рецензирование (внешняя экспертная оценка).

В случае отрицательного отзыва рукопись возвращается автору на доработку. В случае повторного отрицательного отзыва статья отклоняется.

После получения положительной рецензии с рекомендацией к публикации рукопись передается в издательство и проходит предпечатную подготовку.

## ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТУ

**Объем статьи** – не менее 8 и не более 15 страниц при наборе текста в формате Word 14-м кеглем через одинарный интервал.

На первой странице рукописи помещаются УДК, фамилии авторов (с указанием места обучения или работы), название статьи, аннотация и ключевые слова. Текст должен содержать введение, озаглавленные разделы, заключение.

**Формулы** должны быть набраны шрифтом Times New Roman в тексте статьи или в программе Math Type. Буквы латинского алфавита в тексте и формулах набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – обычным шрифтом. Нумеровать нужно только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

**Формат страницы** – А4; каждое поле – 2,5 см; абзацный отступ – 1 см; размер шрифта 14, выравнивание по левому краю; автор (авторы) с указанием места обучения или работы – размер шрифта 14, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; название рукописи – размер шрифта 14, строчные буквы, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; аннотация, ключевые слова – размер шрифта 12, выравнивание по ширине.

Требуемый объем **аннотации** – 200–250 слов. В аннотации должны быть указаны цель, методы, результаты, практическая значимость работы.

**Библиографический список** приводится в конце статьи и составляется по мере упоминания работ в тексте. Ссылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках.

**Рисунки, графики и таблицы** должны иметь номер и заголовок (размер шрифта 12, выравнивание по центру).

**Внимание!** Рисунки и формулы не должны быть сканированными!

**Фотографии предоставляются в двух вариантах:** в тексте статьи и в виде отдельных файлов TIFF и JPEG без сжатия. Название файла должно соответствовать подрисуночной подписи. Сканирование материалов из альбомов, журналов, буклетов, газет и книг влечет за собой сильное понижение качества изображения. Используйте функцию Descreen. Если Вы сканируете фото самостоятельно, выставляйте разрешение 300 dpi (большее не имеет смысла, меньшее приведет к понижению качества). То же самое касается рисунков, графиков и диаграмм, созданных в CorelDRAW и Illustrator. Помещайте в файл в формате Word рисунки только в качестве preview-версии, не забывая прилагать отдельно исходники.

**Важная информация.** Настоящие требования могут быть изменены без оповещения авторов. Неисключительные права на все материалы, опубликованные на сайте журнала, кроме оговоренных случаев, принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС. Все материалы, авторские права на которые принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС, могут быть перепечатаны при наличии письменного разрешения ФГБОУ ВО ПГУПС. Требуется предварительное согласие на перепечатку со стороны издателя.

## Содержание

### ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко, Н. А. Битюцкий, Н. К. Мигулин	Анализ современных подшипниковых узлов, применяемых для высокоскоростного состава, и перспективы их развития	7
В. А. Болотин, Н. Г. Янковская	О влиянии геометрических параметров положения растяжек на их несущую способность при закреплении колесной техники на железнодорожной платформе	18
А. П. Бадецкий, О. А. Медведь, Я. В. Кукушкина	Учет переменного характера расчетных нормативов плана формирования поездов с использованием технологий вычислительного интеллекта	32
О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. В. Трапенов, Т. В. Богачев, В. М. Задорожний	Развитие узловой терминально-складской инфраструктуры: модификация методов исследования и прогнозы	46
О. Д. Покровская	Развитие логистической транспортной системы России в условиях санкций	58
С. А. Пленкин, А. В. Новичихин	Разработка методики перераспределения вагонопотоков (на примере Северо-Западного полигона)	73
А. А. Воробьев, И. В. Федоров, О. А. Конограй, С. А. Метлякова, Н. К. Мигулин	Методика определения минимально допустимой толщины обода цельнокатаных колес грузовых вагонов в эксплуатации	85
А. А. Пугачев, Н. В. Чуприна	Моделирование динамических режимов работы электроприводов с системой векторного управления синхронным двигателем	100
М. С. Подберезная, П. Г. Колпахчян	Энергетический комплекс на базе высокооборотной электрической машины	114

## ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Ю. В. Егоров	Использование коэффициентов эластичности спроса по цене для оценки платежеспособности грузов на железнодорожном транспорте с тарифными целями (на примере РФ в 2006–2023 гг.)	133
--------------	---	-----

## ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

В. Ф. Лапшин	Анализ процессов теплообмена на поверхности надземного трубопровода с теплоизоляцией	147
Ю. П. Бороненко, О. Д. Покровская, Т. С. Титова	Маркетинговое исследование логистики железнодорожной перевозки грузов в съемных кузовах	157

## Contents

### PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

A. A. Vorobyev, A. M. Budjukin, V. G. Kondratenko, N. A. Bityutskiy, N. K. Migulin	Analysis of Modern Bearing Assemblies Used for High-Speed Rolling Stock and Prospects for their Development	7
V. A. Bolotin, N. G. Yankovskaya	The Influence of the Geometric Parameters of the Tie-Downs Placement on Their Bearing Capacity When Securing Wheeled Vehicles on a Railway Platform	18
A. P. Badetsky, O. A. Medved, Ya. V. Kukushkina	Taking into Account the Variable Nature of the Calculation Standards of the Train Formation Plan Using Computational Intelligence Technologies	32
O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. V. Trapenov, T. V. Bogachev, V. M. Zadorozhniy	Development of Hub Terminal and Warehouse Infrastructure: Modification of Research Methods and Forecasts	46
O. D. Pokrovskaya	Development of Russia's Logistics Transport System Under Sanctions	58
S. A. Plenkin, A. V. Novichikhin	Developing a Methodology for the Redistribution of Car Traffic (on the Example of the North-Western Polygon)	73
A. A. Vorobyov, I. V. Fedorov, O. A. Konograi, S. A. Metlyakova, N. K. Migulin	Procedure for determination of minimum permissible rim thickness of solid-rolled The Method of Determining the Minimum Permissible Rim Thickness of Solid-Rolled Wheels of Freight Cars in Operation	85
A. A. Pugachev, N. V. Chuprina	Dynamic Modes Simulation of Synchronous Motor Vector Control Electric Drive	100
M. S. Podbereznaya, P. G. Kolpakhchyan	An Energy Complex Based on a High-Speed Electric Machine	114

---

**ECONOMICS AND MANAGEMENT**

Yu. V. Egorov	The Use of Price Elasticity Coefficients of Demand to Assess the Solvency of Freight in Railway Transport for Tariff Purposes (on the Example of the Russian Federation in 2006–2023)	133
---------------	---	-----

**GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH**

V. F. Lapshin	Analysis of Heat Exchange Processes on the Surface of the Aboveground Pipeline with Heat Insulation	147
Yu. P. Boronenko, O. D. Pokrovskaya, T. S. Titova	Marketing Research of Logistics in Railway Freight Transportation Using Swap Bodies	157

---

## ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.4.027

### **Анализ современных подшипниковых узлов, применяемых для высокоскоростного состава, и перспективы их развития**

**А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко, Н. А. Битюцкий, Н. К. Мигулин**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Воробьев А. А., Будюкин А. М., Кондратенко В. Г., Битюцкий Н. А., Мигулин Н. К. Анализ современных подшипниковых узлов, применяемых для высокоскоростного состава, и перспективы их развития // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 7–17. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-7-17

#### **Аннотация**

**Цель:** Установить основные направления увеличения срока службы и надежности подшипниковых узлов для высокоскоростного подвижного состава. **Методы:** Проведен анализ современных конструкций подшипников и новых материалов, применяемых при их изготовлении. **Результаты:** Анализ выполненных исследований показал, что все рассмотренные конструкции подшипниковых узлов фирмы NSK в основном соответствуют сегодняшним запросам железных дорог, работающих со скоростями до 320 км/ч, и способны обеспечивать безопасность движения поездов при всех существующих условиях эксплуатации. Разработаны рекомендации по комплектации подшипниками буксовых узлов подвижного состава, работающих наиболее успешно при особых условиях эксплуатации. Рассмотрены вопросы контроля неисправности буксовых узлов, работающих на высокоскоростных поездах: TGV, ICE и Talgo, и систем их бортового диагностирования. Дана оценка отечественной системы такого контроля и показаны преимущества отечественной системы перед зарубежными аналогами. Предложено решение диагностики поездов в условиях режима «черного ящика». **Практическая значимость:** Применение современных конструкций подшипников, новых материалов и системы диагностики позволяет повысить надежность и работоспособность рельсового подвижного состава.

**Ключевые слова:** высокоскоростной подвижной состав, подшипниковый узел, новые материалы, уменьшение коэффициента трения, повышение работоспособности, бортовая система диагностики буксовых узлов.

Подшипники являются важнейшей частью буксового узла. Буксовые узлы располагаются на шейках оси и преобразуют вращательное движение колесной пары в поступательное движение вагона. Они воспринимают и передают колесным парам силы тяжести вагона, а также динамические нагрузки, возникающие при движении

вагона по кривым участкам пути, стрелочным переводам, неровностям пути и стыкам рельсов, при торможении, при наличии дефектов на поверхности катания [1–5].

Основными параметрами подшипников, характеризующими их назначение и качество, являются:

- характеристики радиальных и осевых нагрузок;
- максимальная скорость вращения;
- размеры под посадки в буксовом узле;
- точность подшипников;
- характеристики смазывающих материалов;
- ресурс подшипников до появления признаков усталости, в оборотах;
- наличие шумов и вибрации при работе подшипников.

Буксовый подшипник — это сборочный узел, который является частью опоры или упора и поддерживающий вал, ось или иную подвижную конструкцию с заданной жесткостью. Он также фиксирует положение в пространстве, обеспечивает вращение, качение или линейное перемещение (для линейных подшипников) с наименьшим сопротивлением, воспринимает и передает нагрузку от подвижного узла на другие части конструкции, как в радиальном направлении (перпендикулярно оси вращения подшипника), так и в осевом направлении (параллельно оси вращения подшипника).

Значительный вклад в создание высокоскоростного подвижного состава (ПС) внесли технологии, предложенные японскими компаниями, такими как NSK. Ее продукция — это высококачественные подшипники букс, тяговых двигателей и редукторов. В прошлом они использовались в качестве оборудования для поездов Синкансэн серии Н5 сети поездов, курсирующих между городами Аомори и Саппоро. В значительной степени в этом проекте уделялось внимание безопасности и надежности ПС, так как средняя скорость составов составляла 320 км/ч. Поэтому понятно, почему были предложены самые качественные буксовые подшипники (на тот период), характеризующиеся высокими показателями. Железнодорожный оператор Hokkaido Railway подобрал комплект подшипников NSK, разработанных специально для жестких требований высокоскоростного движения. Для буксовых подшипниковых узлов были выбраны двухрядные цилиндрические роликовые подшипники в масляной ванне, отличающиеся малым нагревом даже на высоких оборотах и увеличенным эксплуатационным ресурсом.

Для защиты от повреждений, вызванных сильными токами тяговых электродвигателей, носящих импульсный характер, выбраны изолированные подшипники с диэлектрическим керамическим покрытием, что отличает новое поколение тяговых двигателей от предыдущих. Такое конструктивное решение, хорошо зарекомендовавшее себя в эксплуатации, существенно повышает работоспособность как подшипников, так и двигателей.

В редукторах и приводах колесных пар, подверженных вибрациям, с целью повышения ударопрочности стали использовать подшипники с усиленным сепаратором и с дорожками качения, упрочненными азотированием.

Начиная с начала 60-х годов прошлого века все поезда Синкансэн, предназначенные для высокоскоростного движения, стали комплектовать только подшипниками NSK. В настоящее время железнодорожные подшипники NSK также доминируют на рынках Японии в области своего применения.

В связи с развитием разработок более эффективных электродвигателей, соответствующих современным стандартам, важно, чтобы все компоненты, в том числе и подшипники, также соответствовали новейшим спецификациям. Поэтому в конструкцию были внесены существенные инновационные изменения, затрагивающие технологии изготовления материала, точность изделий и производственные процессы. За счет улучшения обработки поверхностей элементов подшипников удалось уменьшить уровень трения, что, в свою очередь, сокращает расход энергии и уровень шума. Эта компания успешно работает и в направлении улучшения смазки, что позволяет ожидать еще большее увеличение срока службы изделия.

Для увеличения срока службы подшипников NSK использует специальные материалы, такие как сталь Z, EP и SHX. Сталь SHX обладает превосходной стойкостью к заеданию при очень высоких скоростях. Подшипники NSK хорошо работают на высоких скоростях благодаря использованию шариков из сверхвысокопрочной стали и высокоэффективных легких керамических элементов подшипника. Для изготовления сепараторов подшипников NSK используют как широко распространенные материалы, например различные полимеры (альдегидно-фенольные), полиамиды, так и новые специальные полимеры, которым свойственны такие преимущества, как высокая жесткость и термостойкость, а также малый удельный вес. Вследствие этого они надежно работают при различных условиях эксплуатации, а сталь SHX, как более жаропрочная, позволяет увеличить долговечность подшипников при установке их на высокоскоростной ПС. Эта сталь по своим показателям близка к стали M50, которую применяют в узлах реактивных двигателей. Рабочая температура в этих узлах достигает 300 °С. Помимо высокой жаропрочности, сталь SHX характеризуется и небольшим коэффициентом трения, хорошей устойчивостью к вмятинам и всеми другими характеристиками, необходимыми для подшипников, работающих в условиях сверхвысокоскоростных режимов.

В апреле 2007 года мировой рекорд скорости для подвижного состава был установлен высокоскоростным поездом V150, который составил 574,8 км/ч. На локомотиве данного поезда мощностью 18 400 кВт были установлены буксовые подшипники SNR. Процесс конструирования и строительства локомотива занял 14 месяцев. Поставки на линии TGV этих подшипников начались в 1981 году. Знаменательно и то, что мировые рекорды скорости для вертолетов, поездов,

самолетов и мотоциклов (общим количеством 6) были установлены на указанных видах транспорта, оборудованных подшипниками SNR.

Одним из самых перспективных потребителей локомотивов V150 считается Китай. Правительством Китая запланировано на ближайшие годы строительство 12 000 км высокоскоростных железнодорожных линий.

Также для ПС, работающего с высокими скоростями, были разработаны и подшипники EG15, в конструкции которых были предусмотрены сепараторы со стеклонаполненным полиамидом. Они успешно работают в условиях длительной эксплуатации с высокими скоростями в зонах с небольшими температурами и вибрациями (рис. 1). Особенности этих подшипников заключаются в том, что их конструкция обеспечивает:

- значительную прочность сепаратора за счет высокой гибкости используемых эластичных материалов в конструкции подшипника. Эти подшипники являются двухрядными с независимыми сепараторами;
- качество движения роликов обеспечивается специальным, охватывающей формой, сепаратором, изготовленным высокоточным методом литья;
- бесперебойную качественную подачу в зону трения смазки. В конструкции сепараторов для этого предусмотрены соответствующие отверстия. Существенную роль играет и невысокий коэффициент трения благодаря применению пары материалов — сталь и полиамид, что также положительно сказывается и на существенном снижении уровня шума;
- хорошую устойчивость к коррозионным процессам, так как сепаратор устойчив к повреждениям вследствие попадания в подшипник воды и к возникающим электрохимическим процессам;
- длительную работу подшипника при воздействии температуры до 120 °С и кратковременную — 150 °С;
- возможное изменение внутреннего диаметра отверстий в диапазоне 25–400 мм.

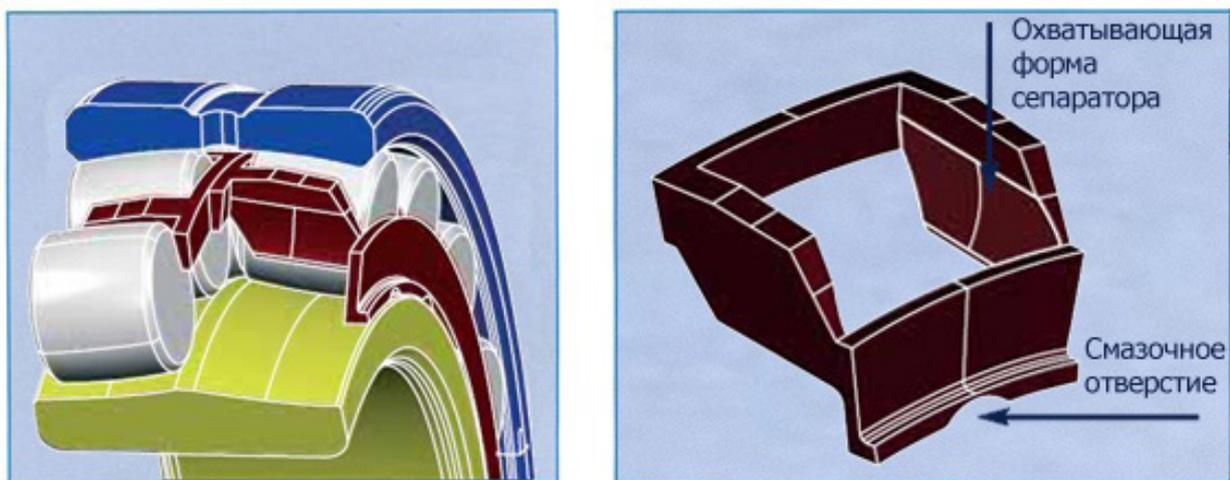


Рис. 1. Подшипники с сепаратором типа EG15

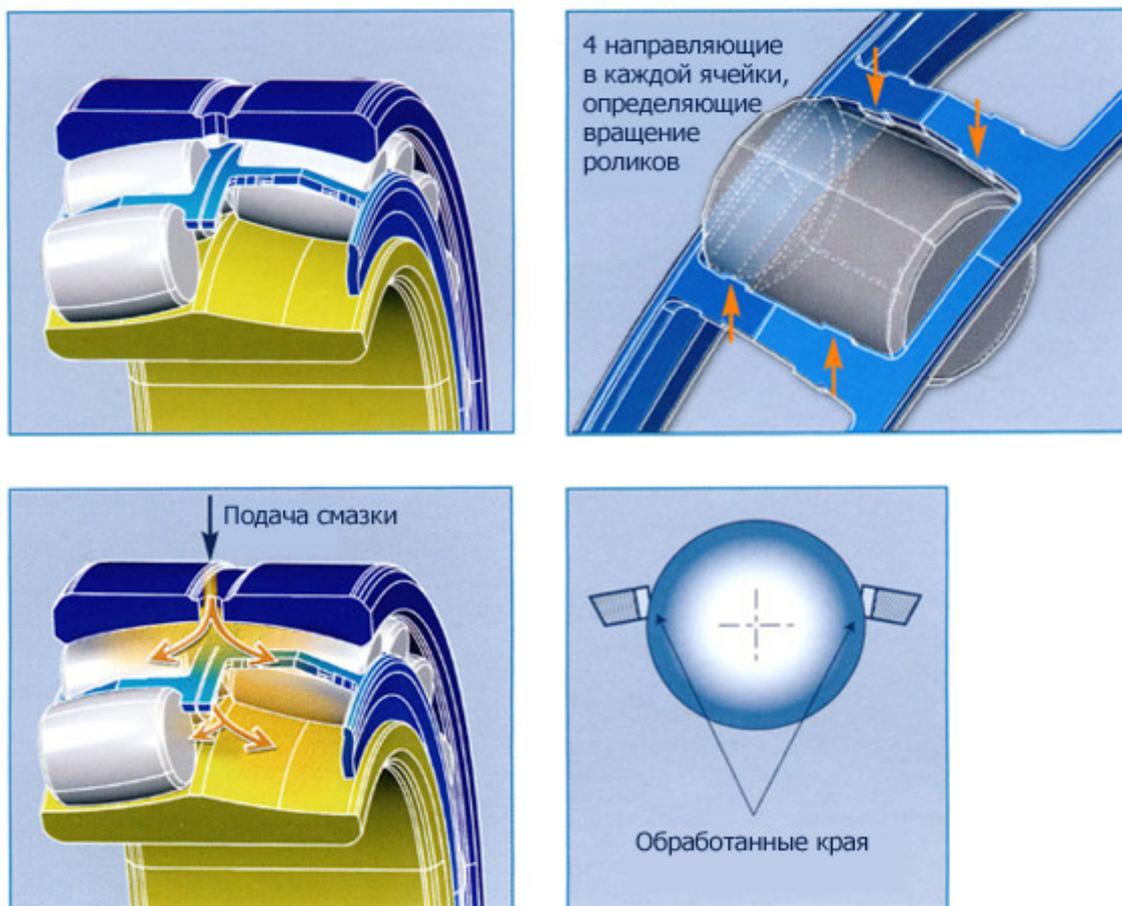


Рис. 2. Подшипники с сепаратором типа EA

Кроме того, широко применяются и подшипники типа EA, имеющие стальной сепаратор и предназначенные для «общего применения», но они также могут использоваться и в узлах, работающих на режимах с температурами более 150 °С и с малыми вибрациями (рис. 2).

Конструктивные особенности подшипника с сепаратором типа EA обеспечивают:

- широкий температурный диапазон от минус 60 до 200 °С;
- точное позиционирование сепаратора относительно дорожки качения внутреннего кольца и плоскости вращающегося подшипника с помощью прецизионных направляющих роликов;
- точная центровка роликов подшипника осуществляется в сепараторе с четырьмя направляющими, что гарантирует идеальную центровку вращающихся элементов без дополнительных компонентов;
- уменьшение коэффициента трения и износа подшипника при работе его на высоких скоростях за счет обработки поверхности подшипникового сепаратора (фосфатизация — масляная закалка);

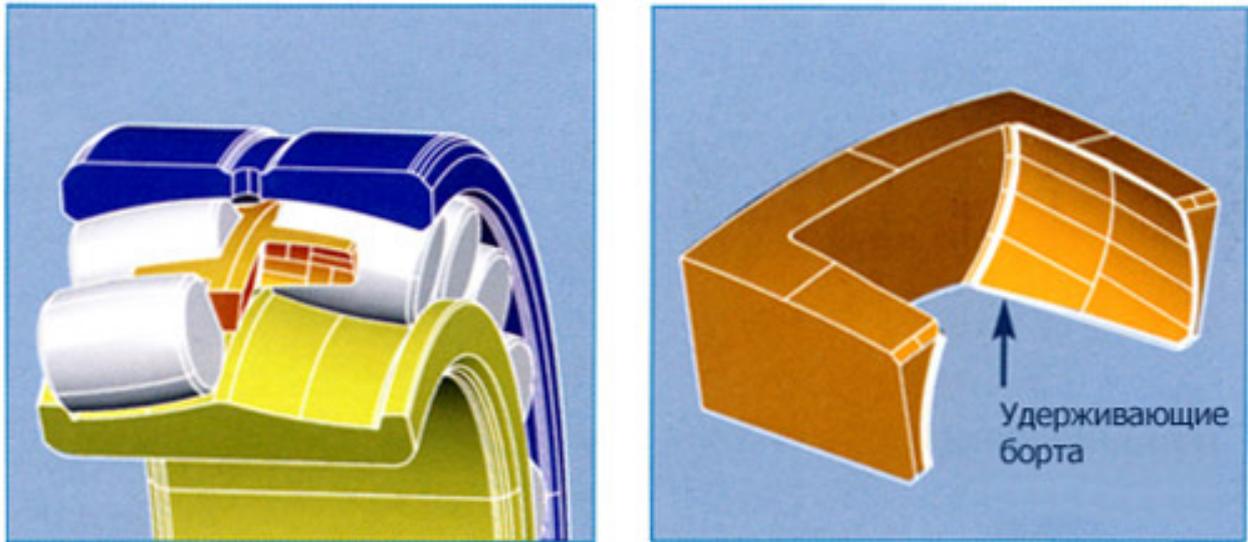


Рис. 3. Подшипники с латунным сепаратором типа EM

– превосходное смазывание всех элементов конструкции, сохраняющее вследствие особой формы сепаратора, сохраняющее запас смазки в подшипнике и облегчающее растекание. Подшипники с сепараторами типа EM стандартно производятся с диаметрами внутреннего отверстия от 25 до 400 мм.

Подшипники с латунным сепаратором типа EM (рис. 3) специально разработаны для работы в условиях высоких температур (до 200 °С) и тяжелых эксплуатационных режимах (высокие скорости вращения, ударные нагрузки, загрязнение и т. д.).

Особенности подшипников с сепаратором EM:

- прочная латунная обойма минимизирует влияние резонанса;
- пластическая деформация латуни повышает прочность и устойчивость к ударным нагрузкам;
- самосмазывающиеся свойства материала сепаратора снижают трение при высоких скоростях вращения;
- боковые рычаги расположены на внутреннем кольце подшипника, поэтому сепаратор находится в центре вращающегося тела;
- контакт с кольцом сепаратора отсутствует, что предотвращает связывание подшипника из-за теплового расширения;
- срок службы при вибрации в семь раз больше, чем у подшипников со стальным сепаратором;
- постоянная температура для работы при высоких температурах (до 200 °С);
- поставляются в стандартном исполнении с диаметром отверстия от 25 мм до 400 мм.

Двухрядные конические роликоподшипники с сепаратором используются в высокоскоростных поездах TGV (Франция), ICE (Германия) и Talgo (Испания), которые движутся со скоростью от 200 до 350 км/ч. (рис. 4).



Рис. 4. Общий вид кассетного подшипника

Двухрядные картриджные подшипники с коническим роликовым сепаратором широко используются в системе привода высокоскоростных железнодорожных транспортных средств благодаря следующим преимуществам:

1. Приспособленность к высоким комбинированным нагрузкам, обеспечивающая высокую топливную экономичность и работу железнодорожного транспорта в пределах установленных интервалов технического обслуживания.

2. Геометрия подшипника подходит для работы на высоких скоростях.

3. Компактная конструкция.

4. Экономически эффективное централизованное техническое обслуживание благодаря принципу картриджной конструкции.

Все рассмотренные и проанализированные конструкции современных буксовых узлов имеют свои достоинства и успешно работают на высокоскоростном подвижном составе. Однако прогресс не стоит на месте, и уже сегодня в европейской железнодорожной системе проходят тесты локомотивы и вагоны, работающие на интеллектуальных подшипниках для колесных пар, со встроенными датчиками, которые измеряют температуру, скорость и ускорение.

На сегодняшний день тепловой метод контроля буксовых узлов является основным методом контроля состояния подшипниковых узлов на европейских и российских железных дорогах. Следует отметить, что с помощью теплового контроля невозможно на ранней стадии развития выявить такие дефекты буксового узла, как трещины в кольцах, роликах и сепараторах, которые представляют существенную угрозу для безопасности движения поездов.

На высокоскоростном транспорте проблема своевременного обнаружения неисправностей подшипниковых узлов является крайне актуальной, так как неисправный подшипниковый узел может привести к сбою графика движения поездов или к крушению поезда с тяжелыми последствиями, но и эта проблема не является уже нерешаемой.

В России ООО «Меткатом» разработана новая бортовая система диагностики буксовых подшипниковых узлов вагонов и локомотивов, которая позволяет не только контролировать температуру подшипниковых узлов, но и определять

остаточный ресурс подшипника (время или пробег до возникновения неисправности), что дает возможность заранее планировать ремонтные работы по подшипниковому узлу. Система разработана на основе уникальной разработки российских ученых — анализатора ресурса подшипников АРП-11. Следует отметить, что в области диагностики подшипниковых узлов последние российские разработки опережают мировые достижения. В ближайшее время следует ожидать, что за счет перехода подвижного состава на необслуживаемые кассетные подшипники на ремонтных предприятиях железных дорог России могут быть ликвидированы роликовые отделения. Но здесь возникает другая проблема — эксплуатация подшипникового узла в режиме «черного ящика», то есть при существующих методах контроля невозможно получить информацию о состоянии элементов подшипникового узла и своевременно принять меры к замене неисправного подшипника. Однако возможность использования бортовой системы диагностики на базе прибора АРП-11 позволит решить эту проблему [6, 7].

Не стоит забывать и о положительном влиянии на окружающую среду, поскольку до 50–60 % смазки остается в кюветах и рельсах локомотивов.

В прогнозах о путях развития и совершенствования конструкций буксовых узлов следует учитывать успешное развитие такой науки, как триботехника. В последнее время создан целый ряд уникальных антифрикционных материалов, обеспечивающих коэффициент трения не выше 0,002 (антифрикционные покрытия на основе дисульфида молибдена), что делает в перспективе возможным возврат на высокоскоростном транспорте к подшипникам скольжения, которые, естественно, существенно проще по конструкции и имеют более высокую допустимую скорость вращения. Также последние исследования показали, что в ближайшей перспективе следует ожидать, что для высокоскоростного транспорта будут созданы магнитные подшипники, у которых соединение является механически бесконтактным. Связь в них осуществляется с помощью сил электромагнитного поля (вращающийся вал буквально парит в мощном магнитном поле).

## Библиографический список

1. Киселев И. П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт / И. П. Киселев, Л. С. Блажко, Н. С. Бушуев и др. // Общий курс. Учебное пособие в 2-х томах. — М., 2014. — Т. 1.
2. Цуканов Н. В. Способы повышения работоспособности буксовых узлов на железнодорожном транспорте / Н. В. Цуканов, Т. С. Титова, А. А. Воробьев // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте рельсового подвижного состава: сборник трудов национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. — 2022. — С. 5–11.
3. Кононов Д. П. Железнодорожные подшипники кассетного типа / Д. П. Кононов, К. А. Румаков // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава

РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 20–21 ноября 2015 г. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. — С. 25–26.

4. Поляхов Н. Д. Обзор способов практического применения активных магнитных подшипников. / Н. Д. Поляхов, А. Д. Стоцкая. — М.: Научное приборостроение, 2012. — Т. 22, № 4, 5. — 18 с.

5. Урушев С. В. Ресурс и технология изготовления металлических сепараторов кассетных подшипников / С. В. Урушев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко и др. // Бюллетень результатов научных исследований. — 2014. — № 1(10). — С. 143–158.

6. Трусов А. А. Оценка эксплуатационных свойств и ресурса буксовых подшипников, применяемых на подвижном составе РЖД / А. А. Трусов, А. М. Будюкин // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2017. — С. 17–21.

7. Васильев В. О. Оценка качества роликов подшипников качения буксовых узлов, упрочненных современными технологическими методами / В. О. Васильев, В. Г. Кондратенко // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2017. — С. 41–43.

Дата поступления: 05.05.2023

Решение о публикации: 18.06.2023

#### **Контактная информация:**

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, проф.; 79219751198@yandex.ru

БУДЮКИН Алексей Митрофанович — канд. техн. наук, доц.; nttk@pgups.ru

КОНДРАТЕНКО Владимир Григорьевич — канд. техн. наук, доц.; nttk@pgups.ru

БИТЮЦКИЙ Никита Александрович — канд. техн. наук, доц.; bna@engcenter.ru

МИГУЛИН Никита Константинович — аспирант; migulinnik@rambler.ru

## **Analysis of Modern Bearing Assemblies Used for High-Speed Rolling Stock and Prospects for their Development**

**A. A. Vorobyev, A. M. Budjugin, V. G. Kondratenko, N. A. Bityutskiy, N. K. Migulin**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Vorobyev A. A., Budjugin A. M., Kondratenko V. G., Bityutskiy N. A., Migulin N. K. Analysis of Modern Bearing Assemblies Used for High-Speed Rolling Stock and Prospects for their Development. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 7–17. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-7-17

## Summary

**Purpose:** To identify the main directions for increasing the service life and reliability of bearing assemblies for high-speed rolling stock. **Methods:** An analysis of modern bearing designs and new materials used in their manufacturing has been conducted. **Results:** The analysis of the conducted research has shown that all the examined designs of bearing assemblies produced by NSK company mainly meet the current demands of railways operating at speeds up to 320 km/h, and can ensure the safety of train movement under all existing operating conditions. Recommendations for equipping the axle box units of rolling stock with bearings that perform most successfully under special operating conditions have been developed. The issues of monitoring the faults of axle box units operating on high-speed trains, such as TGV, ICE, and Talgo, and the systems of their onboard diagnostics, have been addressed. An assessment of the domestic control system is provided, and its advantages over foreign counterparts are demonstrated. A solution for diagnosing trains under the 'black box' regime has been proposed. **Practical significance:** The application of modern bearing designs, new materials, and diagnostic systems allows for an increase in the reliability and performance of railway rolling stock.

**Keywords:** High-speed rolling stock, bearing unit, new materials, friction coefficient reduction, increased performance, onboard diagnostic system for axle box units.

## References

1. Kiselev I. P., Blazhko L. S., Bushuev N. S. et al. *Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport [High-speed rail transport]. Obshchiy kurs. Uchebnoe posobie v 2-kh tomakh [General course. Textbook in 2 volumes]*. Moscow, 2014, vol. 1. (In Russian)
2. Tsukanov N. V., Titova T. S., Vorob'ev A. A. *Sposoby povysheniya rabotosposobnosti buksovykh uzlov na zheleznodorozhnom transporte. Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte rel'sovogo podvizhnogo sostava: sbornik trudov natsional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh [Ways to improve the performance of axle boxes in railway transport. Progressive technologies used in the repair of rail rolling stock: a collection of proceedings of the national scientific and technical conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists]*. 2022, pp. 5–11. (In Russian)
3. Kononov D. P., Rumakov K. A. *Zheleznodorozhnye podshipniki kassetnogo tipa. Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Sankt-Peterburg, 20–21 noyabrya 2015 g. [Railway cassette-type bearings. Progressive technologies used in the repair of Russian Railways rolling stock: a collection of proceedings of the conference of students, graduate students and young scientists, St. Petersburg, November 20–21, 2015]*. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2016, pp. 25–26. (In Russian)
4. Polyakhov N. D., Stotskaya A. D. *Obzor sposobov prakticheskogo primeneniya aktivnykh magnitnykh podshipnikov [Review of methods for the practical application of active magnetic bearings]*. Moscow: Nauchnoe priborostroenie Publ., 2012, vol. 22, Iss. 4, 5, 18 p. (In Russian)
5. Urushev S. V., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. et al. *Resurs i tekhnologiya izgotovleniya metallicheskiy separatorov kassetnykh podshipnikov [Resource and manufacturing technology of*

metal cages for cassette bearings]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of results of scientific research]. 2014, Iss. 1(10), pp. 143–158. (In Russian)

6. Trusov A. A., Budyukin A. M. *Otsenka ekspluatatsionnykh svoystv i resursa buksovykh podshipnikov, primenyaemykh na podvizhnom sostave RZhD. Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Evaluation of the operational properties and resource of axle bearings used on the rolling stock of Russian Railways. Progressive technologies used in the repair of rolling stock of Russian Railways: a collection of proceedings of the conference of students, graduate students and young scientists]. 2017, pp. 17–21. (In Russian)

7. Vasil'ev V. O., Kondratenko V. G. *Otsenka kachestva rolikov podshipnikov kacheniya buksovykh uzlov, uprochnennykh sovremennymi tekhnologicheskimi metodami. Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Evaluation of the quality of rolling bearing rollers of axlebox units hardened by modern technological methods. Progressive technologies used in the repair of rolling stock of Russian Railways: a collection of proceedings of the conference of students, graduate students and young scientists]. 2017, pp. 41–43. (In Russian)

Received: May 05, 2023

Accepted: June 18, 2023

**Author's information:**

Alexandr A. VOROYEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; 79219751198@yandex.ru

Alexey M. BUDJUKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; nttk@pgups.ru

Vladimir G. KONDRATENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; nttk@pgups.ru

Nikita A. BITYUTSKIY — PhD in Engineering, Associate Professor; bna@engcenter.ru

Nikita K. MIGULIN — Postgraduate Student, migulinnik@rambler.ru

УДК 656.212.2.073

## О влиянии геометрических параметров положения растяжек на их несущую способность при закреплении колесной техники на железнодорожной платформе

В. А. Болотин, Н. Г. Янковская

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Болотин В. А., Янковская Н. Г. О влиянии геометрических параметров положения растяжек на их несущую способность при закреплении колесной техники на железнодорожной платформе // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 18–31. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-18-31

### Аннотация

**Цель:** Рассмотрены вопросы крепления колесной техники на универсальной железнодорожной платформе. На практике наиболее распространено крепление растяжек за оси колесной техники. Проведено исследование с целью определения оптимальных параметров проволочных растяжек в зависимости от мест их расположения на грузе. Проведенный вычислительный эксперимент позволил выявить, что применяемое место крепления растяжек не является оптимальным. Также исследовано влияние различных факторов на количество гвоздей для крепления упорных брусьев, закрепляющих колесную технику. **Методы:** Применены теория планирования многофакторного эксперимента, методы регрессионного анализа. **Результаты:** Установлено влияние геометрических параметров размещения растяжек на их несущую способность при условии крепления колесной техники от перекатывания. **Практическая значимость:** Полученные результаты исследований позволяют выбирать наиболее рациональные точки крепления растяжек на раме колесной техники и платформе. Предложенная методика прошла апробацию при перевозках колесной техники со станций Октябрьской железной дороги филиала ОАО «РЖД».

**Ключевые слова:** Железнодорожный транспорт, открытый подвижной состав, колесная техника, крепление, расчетная схема, многофакторный эксперимент, латинский квадрат, геометрические параметры положения растяжек.

### Введение

При перевозке на открытом подвижном составе (чаще на платформе) колесная техника должна быть должным образом закреплена. Для этого используются предусмотренные Техническими условиями (далее — ТУ) [1] и Приложением 3 к СМГС [2] элементы крепления: упорные брусья и проволочные растяжки. Крепление должно обеспечить безопасность перевозки и сохранность груза [3], для чего техника закрепляется от сдвига и перекатывания через упорные брусья. Данной проблеме посвящен ряд научных трудов [4–8], однако ни в одном из них не исследовано влияние геометрических параметров положения растяжек при закреплении колесной техники на их несущую способность.

## Состояние вопроса

Место установки растяжек для каждой единицы колесной техники определяется в зависимости от ее конструктивных особенностей и расположения ее на вагоне. Чаще всего крепление растяжками производится за оси техники. Место установки растяжки определяет такие важные геометрические параметры, как углы наклона растяжки к полу вагона и углы между ее проекцией на горизонтальную плоскость и продольной и поперечной осям вагона. От угла наклона зависит величина усилия, воспринимаемая растяжками, а следовательно, способность растяжки удерживать груз от перекатывания через упорный брус, подклинивающий колеса техники при перевозке.

Это подтверждено исследованиями [9], результаты которых использованы и развиты в данной статье. Кроме того, рассматривается влияние на несущую способность растяжек основных параметров колесного груза (масса, диаметр колеса) и геометрических параметров размещения растяжек (места закрепления растяжек на грузе и на боковых увязочных скобах платформы).

## Исследование влияния геометрических параметров положения растяжек на их несущую способность

Для исследования принята обобщенная расчетная модель закрепления колесной техники от продольных смещений на платформе (рис. 1).

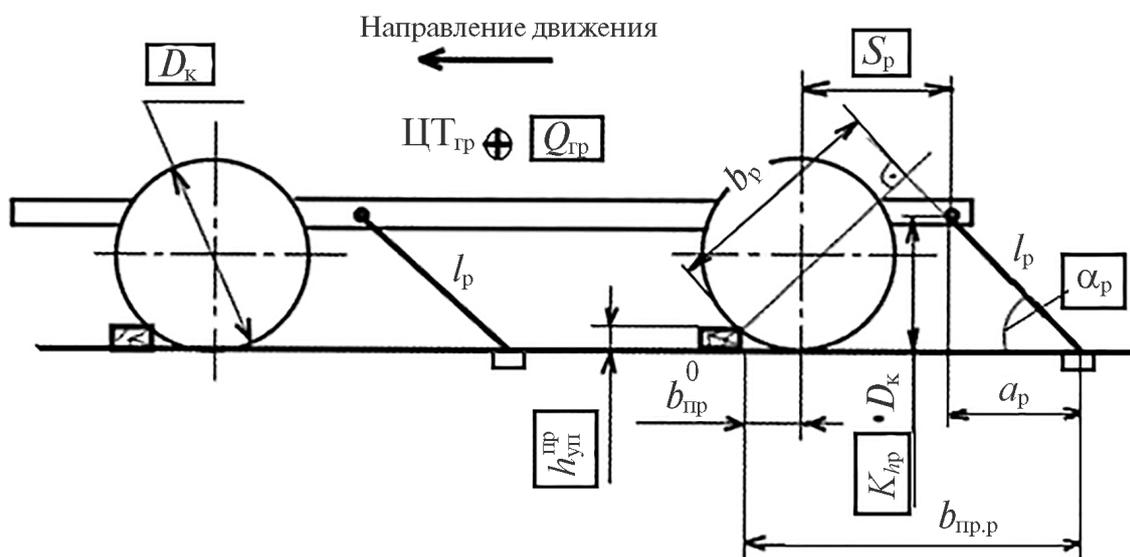


Рис. 1. Обобщенная расчетная модель закрепления колесной техники от продольных смещений на платформе

Колесная техника, предъявляемая к перевозке, разнообразна по конструктивным особенностям, количеству осей, что проблематично учесть в одном исследовании, поэтому в расчетной модели принят ряд допущений и ограничений. Принято для исследования, что колесная техника двухосная, погруженная на универсальную платформу, каждое из четырех колес подклинено одним упорным брусом в одном направлении, каждый упорный брус закрепляется на полу вагона равным количеством гвоздей; кузов колесной техники закрепляется четырьмя однотипными растяжками, имеющими одинаковую длину, углы наклона к полу вагона и к продольной оси вагона; точки закрепления растяжек на кузове техники имеют одинаковые координаты по длине и высоте относительно осей колес. Данное крепление удерживает груз при движении в одну сторону.

Принятое для исследования параметрическое описание груза и элементов крепления включает шесть параметров:

- массу груза  $Q_{гр}$ ;
- диаметр колеса  $D_k$ ;
- высоту упорного бруса  $h_{уп}^{пр}$ ;
- продольную координату точки закрепления растяжки на корпусе груза относительно оси колеса  $S_p$ ;
- вертикальную координату точки закрепления растяжки на корпусе груза относительно пола вагона, привязанную к диаметру колеса коэффициентом  $K_{hp}$ ;
- угол наклона проекции растяжки на вертикальную продольную плоскость вагона к полу вагона  $\alpha_p$ .

Ряд параметров не меняется в ходе исследования. К ним отнесены:

- общее количество упорных брусьев, закрепляющих колеса груза от перекачивания,  $n_{бр} = 4$ ;
- общее количество растяжек, закрепляющих груз от сдвига в продольном направлении при движении в одну сторону,  $n_p = 4$ ;
- угол между растяжкой и ее проекцией на вертикальную продольную плоскость вагона, град. Учитывает расположение растяжек под углом к продольной оси вагона, принят равным  $\gamma_p = 30^\circ$ ;
- коэффициент трения между упорным брусом и опорной поверхностью (полом вагона), для пары дерево по дереву  $\mu_{бр} = 0,45$ ;
- нормируемая нагрузка на один гвоздь диаметром 6 мм, которыми прибиваются брусья к полу вагона,  $R_{гв} = 108$  кг.

Математические связи рассматриваемых параметров :

- расчетная длина растяжки:

$$l_p = K_{hp} D_k \frac{1}{\sin \alpha_p};$$

– расстояние от точки перекачивания колес до проекции растяжки на вертикальную плоскость, в которой расположены растяжки:

$$b_p = K_{hp} D_k \frac{b_{пр.р}}{l_p};$$

– расстояние от точки перекачивания колес до точки закрепления растяжки на платформе:

$$b_{пр.р} = b_{пр}^0 + S_p + K_{hp} D_k \operatorname{ctg} \alpha_p;$$

– проекция растяжки на продольную ось вагона:

$$a_p = K_{hp} D_k \operatorname{ctg} \alpha_p.$$

Расчет величины продольной инерционной силы  $F_{пр}$ , действующей на груз, и количество гвоздей для закрепления упорного бруса под колесом производится согласно методике главы 1 ТУ [1].

Последовательность расчетов, соответствующая методике главы 1 ТУ, представлена на рис. 2

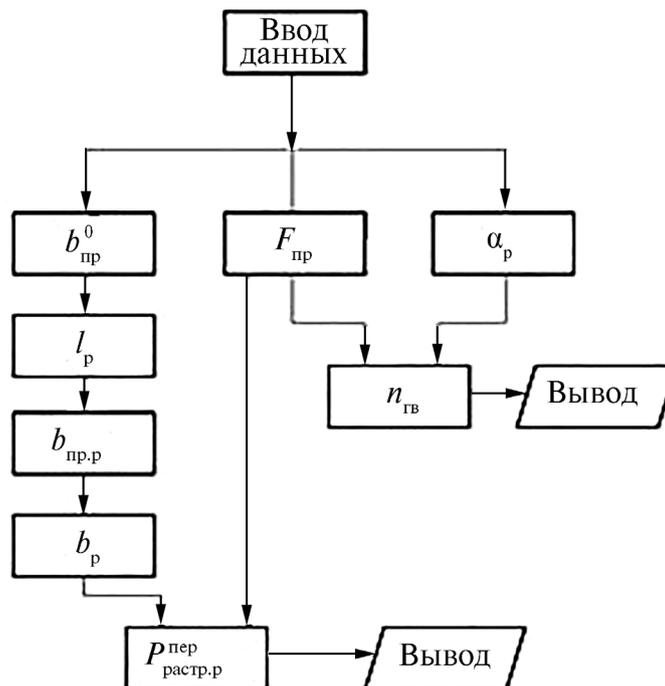


Рис. 2. Блок-схема последовательности расчета параметров элементов крепления колесного груза на платформе

ТАБЛИЦА 1. Принятые значения варьируемых параметров

Обозначение параметра	Размерность параметра	Значение параметра на уровнях				
		1	2	3	4	5
$Q_{гр}$	т	10	20	30	40	50
$D_k$	м	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
$h_{уп}^{пр}$	м	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
$S_p$	м	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
$K_{hp}$	—	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
$\alpha_p$	град	35	40	45	50	55

С целью сокращения объема вычислений и полного охвата пространства изменения исследуемых параметров расчетной модели крепления колесной техники на платформе использовалась теория планирования многофакторного эксперимента, разработанная в [10] и подтвержденная исследованием других инженерных задач [11, 12]. На основании этой теории предложен и подтвержден результатами исследований метод разработки регрессионных моделей исследуемых процессов вида:  $y_j = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , которые удобны в использовании на практике.

Для составления плана проведения вычислительных экспериментов использованы ортогональные латинские квадраты, рекомендованные в [10].

Для каждого из выбранных варьируемых факторов были приняты пять фиксированных уровней значений, приведенных в табл. 1, по которым составлены латинские ортогональные квадраты.

Для сокращения объема вариационных расчетов разработан план проведения многофакторного эксперимента на основе шести (по числу варьируемых факторов) ортогональных квадратов. Разработанный план вариационных расчетов приведен в табл. 2. Из плана проведения вычислительного эксперимента видно, что в каждом варианте расчета принимается новое неповторяющееся сочетание уровней параметров.

Принятая методика планирования эксперимента позволяет путем усреднения результатов оценить влияние на исследуемый процесс любого из принятых параметров. При этом остальные варьируемые параметры оказываются фиксированными на среднем уровне.

Результаты исследования влияния параметров колесного груза и схемы его крепления на платформе, полученные вариационными расчетами с использованием плана проведения вычислительного эксперимента, приведены в табл. 2.

На основании результатов вариационных расчетов потребности гвоздей для крепления упорных брусьев, подкрепляющих колеса техники, и усилий в растяжках при различных комбинациях независимых параметров груза и схемы крепления проделана выборка значений результатов, полученных при значениях каждой из переменных на разных уровнях. По этим усредненным данным построены

графики зависимостей потребности гвоздей и усилий в растяжках от каждого варьируемого параметра (рис. 3 и 4).

Количество гвоздей согласно формуле, приведенной в [9], зависит от массы груза, диаметра колеса и высоты упорных брусьев.

$$n_{\text{ГВ}} = \frac{F_{\text{пр}} (1 - \mu_{\text{бпр}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{бпр}})}{n_{\text{бпр}} R_{\text{ГВ}}}$$

ТАБЛИЦА 2. План вариационных расчетов параметров крепления колесного груза на платформе и результаты расчета параметров крепления груза

Вариант расчета	Уровни варьируемых параметров						Результаты расчета	
	$Q_{\text{гр}}$	$D_{\text{к}}$	$h_{\text{уп}}^{\text{пр}}$	$S_{\text{р}}$	$K_{\text{пр}}$	$\alpha_{\text{р}}$	$n_{\text{ГВ}}$	$P_{\text{раст.р}}^{\text{пер}}$
	т	м	м	м	–	град	шт	кг
1	10	0,8	0,10	0,6	0,50	35	6	1500
2	10	1,0	0,12	1,0	0,65	55	6	1066
3	10	1,2	0,14	1,4	0,55	50	6	1050
4	10	1,4	0,16	0,8	0,70	45	6	1388
5	10	1,6	0,18	1,2	0,60	40	6	1373
6	20	0,8	0,12	0,8	0,55	40	15	2229
7	20	1,0	0,14	1,2	0,70	35	14	2013
8	20	1,2	0,16	0,6	0,60	55	13	2853
9	20	1,4	0,18	1,0	0,50	50	13	2644
10	20	1,6	0,10	1,4	0,65	45	5	2588
11	30	0,8	0,14	1,0	0,60	45	23	2529
12	30	1,0	0,16	1,4	0,50	40	22	2711
13	30	1,2	0,18	0,8	0,65	35	21	3754
14	30	1,4	0,10	1,2	0,55	55	9	3747
15	30	1,6	0,12	0,6	0,70	50	10	4782
16	40	0,8	0,16	1,2	0,65	50	33	2586
17	40	1,0	0,18	0,6	0,55	45	31	4767
18	40	1,2	0,10	1,0	0,70	40	16	4819
19	40	1,4	0,12	1,4	0,60	35	16	4929
20	40	1,6	0,14	0,8	0,50	55	17	6177
21	50	0,8	0,18	1,4	0,70	55	42	2506
22	50	1,0	0,10	0,8	0,60	50	24	5758
23	50	1,2	0,12	1,2	0,50	45	24	5596
24	50	1,4	0,14	0,6	0,65	40	24	7290
25	50	1,6	0,16	1,0	0,55	35	24	7238

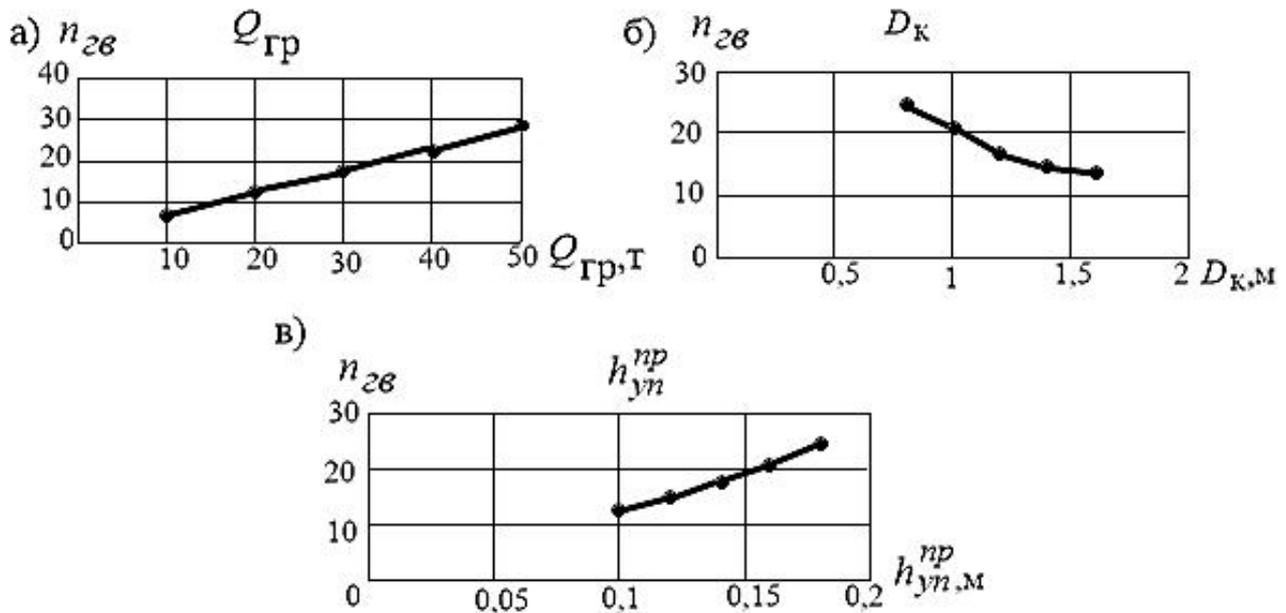


Рис. 3. Графики зависимостей потребности гвоздей для закрепления упорного бруса от параметров груза и высоты упорного бруса:  
 а — массы груза; б — диаметра колеса; в — высоты упорного бруса

Анализ результатов исследований (см. рис. 3) показывает, что рост потребности гвоздей при увеличении массы груза и высоты упорного бруса носит линейный характер. Так, при увеличении массы груза с 10 до 50 тонн потребность гвоздей возрастает примерно в 5 раз, с 7 до 29 штук. Увеличение высоты упорного бруса также приводит к увеличению потребности гвоздей вследствие уменьшения величины вертикальной составляющей силы давления колеса на упорный брус. С увеличением высоты упорного бруса со 100 до 180 мм потребность в гвоздях, которыми прибивается упорный брус к полу вагона, возрастает с 13 до 25, т. е. примерно в 2 раза.

Диаметр колеса оказывает иное воздействие. С увеличением диаметра колеса увеличивается величина вертикальной составляющей силы давления колеса на упорный брус. Зависимость носит нелинейный характер. При возрастании диаметра колеса с 800 до 1600 мм потребность в гвоздевом креплении снижается с 25 до 14 штук, т. е. в 1,7 раза.

Усилие в растяжке, удерживающее колесную технику от перекатывания колес, рассчитывается по формуле [1]:

$$P_{\text{раст.р}}^{\text{пер}} = \frac{1,25 F_{\text{пр}} \left( \frac{D_{\text{к}}}{2} - h_{\text{уп}}^{\text{пр}} \right) - Q_{\text{гр}} b_{\text{пр}}^0}{n_{\text{р}} b_{\text{р}} n \cos \gamma_{\text{р}}}$$

Анализ результатов исследований (см. рис. 4) показывает, что изменение расчетного усилия в растяжках носит линейный и слабовыраженный нелинейный характер. Наибольшее влияние на усилие в растяжках оказывают масса груза, диаметр колеса и расстояние точки закрепления растяжки на корпусе груза от оси колеса. Так, при увеличении массы груза с 10 до 50 тонн усилие в растяжках возрастает более чем в 4 раза, с 1275 до 5677 кг.

Увеличение диаметра колеса приводит к возрастанию момента перекатывания, и, как следствие, с увеличением диаметра колеса с 800 до 1600 мм усилие в растяжках возрастает с 2282 до 4431 кг, т. е. в 2 раза.

Увеличение высоты упорного бруса, высоты точки закрепления растяжки на корпусе груза относительно пола вагона и угла наклона растяжки к полу вагона приводит к снижению усилий в растяжках не более 20 %.

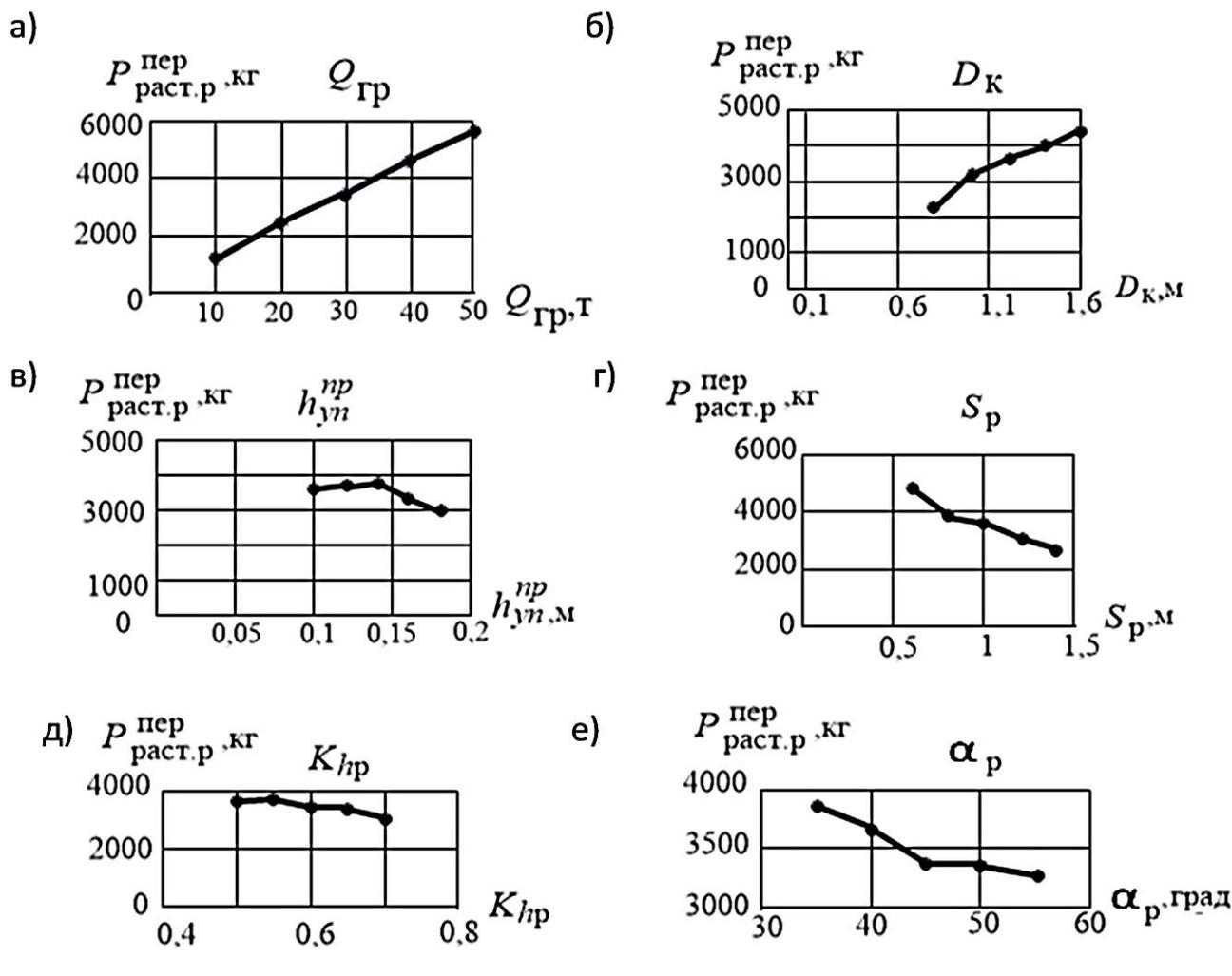


Рис. 4. Графики зависимостей усилий в растяжках, закрепляющих груз, от параметров груза и геометрических параметров расположения растяжек:  
 а — массы груза; б — диаметра колеса; в — высоты упорного бруса;  
 г — горизонтальной координаты закрепления растяжки на корпусе груза;  
 д — вертикальной координаты закрепления растяжки на корпусе груза;  
 е — угла наклона растяжки к полу вагона

На базе аппроксимации полученных зависимостей нелинейными и линейными функциями  $\varphi_i$  согласно теории планирования многофакторного эксперимента [10] можно разработать регрессионную модель в виде:

$$\tau = \sum_1^n \varphi_i - (n-1)(\bar{\varphi}),$$

где  $\bar{\varphi}$  — глобальное среднее арифметическое из значений искомого параметра  $\tau$ , рассчитанного по всем реализациям плана выполнения вариационных вычислений функции  $\varphi_i$ ;

$n$  — количество варьируемых переменных.

Аппроксимацией вариационных вычислений значений количества гвоздей, которыми прибиваются упорные брусья к полу платформы, методом наименьших квадратов получены следующие эмпирические формулы по каждому параметру:

$$\varphi_1 = f(Q_{\text{гр}}) = 0,54 Q_{\text{гр}} + 1,8,$$

$$\varphi_2 = f(D_{\text{к}}) = 14,3 D_{\text{к}}^2 - 48,2 D_{\text{к}} + 54,6,$$

$$\varphi_3 = f(h_{\text{уп}}^{\text{пп}}) = 150 h_{\text{уп}}^{\text{пп}} - 2,6.$$

После подстановки приведенных формул в обобщенную формулу регрессионной модели, приведенную выше, с учетом глобального среднего количества гвоздей (18 шт.) получена эмпирическая зависимость для определения количества гвоздей, которыми требуется прибивать к полу платформы упорные брусья:

$$n_{\text{гв}} = 0,54 Q_{\text{гр}} + 14,3 D_{\text{к}}^2 - 48,2 D_{\text{к}} + 150 h_{\text{уп}}^{\text{пп}} + 17,8.$$

Аналогичным методом выведена эмпирическая формула для определения величины усилия в растяжках, используемых для закрепления колесного груза на платформе от перекатывания:

$$\varphi_1 = f(Q_{\text{гр}}) = 109,94 Q_{\text{гр}} + 217.$$

$$\varphi_2 = f(D_{\text{к}}) = -1900 D_{\text{к}}^2 + 7077 Q_{\text{гр}} - 2086,6.$$

$$\varphi_3 = f(K_{\text{hp}}) = -3200 K_{\text{hp}} + 5435.$$

$$\varphi_4 = f(\alpha_{\text{p}}) = -31,08 \alpha_{\text{p}} + 4913.$$

$$\varphi_5 = f(h_{\text{уп}}^{\text{пр}}) = -238\,035,71(h_{\text{уп}}^{\text{пр}})^2 + 58\,005h_{\text{уп}}^{\text{пр}} + 248,82.$$

$$\varphi_6 = f(P_{\text{раст.р}}^{\text{пер}}) = -2444,5 \cdot S_p + 6090.$$

$$P_{\text{раст.р}}^{\text{пер}} = 110Q_{\text{гр}} - 1900cD_{\text{к}}^2 + 7077D_{\text{к}} - 3200nK_{\text{hp}} - \\ - 10^3 \left( 238(h_{\text{уп}}^{\text{пр}})^2 + 58h_{\text{уп}}^{\text{пр}} \right) - 2444S_p - 31\alpha_p - 2768.$$

В приведенных формулах для переменных приняты размерности, приведенные в табл. 1.

Расчеты, выполненные по предложенным регрессионным моделям, показывают относительную ошибку не более 5 % с данными эксперимента.

В существующей практике расчетов крепления колесной техники на платформе колесный груз принимается в виде груза с плоской опорой.

Суммарное количество гвоздей, которыми закрепляются упорные брусья под колесами техники, рассчитываются исходя из отсутствия сдвига брусьев при перекачивании колес. Расчет параметров растяжек производится исходя из отсутствия сдвига груза. При этом величина коэффициента трения резиновых колес по деревянному полу вагона принимается на уровне 0,5. Условием такого допущения является надежное затормаживание колес от возможного вращения. Если техника не оборудована стояночными тормозами (прицепы, фургоны и т. п.) принимаемая в расчетах величина коэффициента трения снижается до 0,1.

В табл. 3 приведены сравнительные результаты расчетов усилий в растяжках для исследуемой обобщенной схемы крепления колесного груза на платформе, полученные традиционным расчетом с коэффициентом трения колес по полу вагона 0,1 и полученные по предлагаемой методике расчета с учетом перекачивания колес. Анализ этих данных показывает, что усилия в растяжках, рассчитанные по предлагаемой методике, меньше в среднем на 35 %. Эта разница увеличивается значительно до 50–60 % при больших массах груза 40–50 т.

## Заключение

Из приведенных данных следует, что точки закрепления растяжек на корпусе колесной техники надо выбирать наиболее удаленными от вертикальной плоскости, в которой находятся оси колес. Следовательно, широко используемое крепление колесной техники за элементы осей не является рациональным и ведет к снижению несущей способности растяжек, компенсирующих избыточную продольную силу. Это может стать причиной как несохранной перевозки, так и нарушения безопасности движения.

ТАБЛИЦА 3. Сравнительные результаты расчета параметров крепления колесного груза на платформе

Вариант расчета	Уровни варьируемых параметров						$n_{гв}$ , шт.	$P_{раст.р}^{пер}$ , кг		
	$Q_{гр}$ , Т	$D_k$ , М	$h_{уп}^{пр}$ , М	$S_p$ , М	$K_{лр}$	$\alpha_p$ , град		Методика расчета		% различия
								предлагаемая	существующая	
1	10	0,8	0,10	0,6	0,50	35	6	1500	1398	-7
2	10	1,0	0,12	1,0	0,65	55	6	1066	1743	+66
3	10	1,2	0,14	1,4	0,55	50	6	1050	1623	+55
4	10	1,4	0,16	0,8	0,70	45	6	1388	1527	+18
5	10	1,6	0,18	1,2	0,60	40	6	1373	1454	+6
6	20	0,8	0,12	0,8	0,55	40	15	2229	2640	+18
7	20	1,0	0,14	1,2	0,70	35	14	2013	2613	+30
8	20	1,2	0,16	0,6	0,60	55	14	2853	3259	+14
9	20	1,4	0,18	1,0	0,50	50	13	2644	3032	+15
10	20	1,6	0,10	1,4	0,65	45	5	2588	4439	+71
11	30	0,8	0,14	1,0	0,60	45	24	2529	3113	+21
12	30	1,0	0,16	1,4	0,50	40	22	2711	3235	+19
13	30	1,2	0,18	0,8	0,65	35	22	3754	3371	-10
14	30	1,4	0,10	1,2	0,55	55	10	3747	8130	+112
15	30	1,6	0,12	0,6	0,70	50	11	4782	7261	+52
16	40	0,8	0,16	1,2	0,65	50	33	2586	4026	+51
17	40	1,0	0,18	0,6	0,55	45	31	4767	3791	-21
18	40	1,2	0,10	1,0	0,70	40	16	4819	7891	+62
19	40	1,4	0,12	1,4	0,60	35	17	4929	7269	+47
20	40	1,6	0,14	0,8	0,50	55	17	6177	9021	+47
21	50	0,8	0,18	1,4	0,70	55	42	2506	4063	+60
22	50	1,0	0,10	0,8	0,60	50	24	5758	9253	+61
23	50	1,2	0,12	1,2	0,50	45	24	5596	8714	+55
24	50	1,4	0,14	0,6	0,65	40	24	7290	8255	+14
25	50	1,6	0,16	1,0	0,55	35	24	7238	7938	+10

Из проведенных исследований также можно сделать вывод о необходимости оборудования корпусов колесной техники для крепления растяжек специальными кронштейнами, проушинами, петлями, место установки которых наиболее удалено от осей колес.

Предложенная методика прошла апробацию при перевозках колесной техники со станций Октябрьской железной дороги филиала ОАО «РЖД» в 2014–20 гг.: агрегат сварочный АС 81 (ТУП07.14-666 00.000 ПЗ), трактор-тягач К-700Т (ТУП07.15-696.00.000 ПЗ), экскаватор Zaxis 210W (ТУП07.15-274-00.000 ПЗ), автокран КС-45721 (ТУП07.17-710 00.000 ПЗ), мотовоз МПТ-6 (ТУП05.20-719 00.000 ПЗ).

## Библиографический список

1. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. — М.: Юртранс, 2003. — 544 с.
2. Приложение 3 к СМГС «Технические условия размещения и крепления грузов». — URL: <http://osjd.org/doco/public/ru>.
3. Нутович В. Е. Цифровое обеспечение и соблюдение технических условий размещения и крепления грузов / В. Е. Нутович // Мир транспорта. — 2018. — № 4. — С. 52–59.
4. Гордиенко А. А. Математическое моделирование взаимодействия шин колесной техники при ее перевозке и пола вагона / А. А. Гордиенко. // Труды международной научно-практической конференции «Транспорт-2013». — Ростов-на-Дону: РГУПС, 2013. — С. 283–285.
5. Гордиенко А. А. Разработка методики оценки амплитуд вертикальных колебаний колесной техники, перевозимой на открытом подвижном составе / А. А. Гордиенко // Транспорт: Наука, техника, управление. — 2013. — № 5. — С. 64–68.
6. Туранов Х. Т. Пример расчета по новой методике гибких элементов крепления колесной техники при воздействии продольных сил / Х. Т. Туранов, Е. Д. Псеровская, А. А. Гордиенко // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2014. — № 4. — С. 50–57.
7. Ситников С. А. Определение устойчивости колесной техники, перевозимой на платформе при наличии гибких элементов крепления / С. А. Ситников // Бюллетень науки и практики. — 2021. — Т. 7. — № 8. — С. 253–263.
8. Туранов Х.Т., Рузметов Я.О., Шихназаров Ж.А. К расчету крепления твердотельного груза при воздействии продольных сил // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2020. Т.10. №1. С.32-42.
9. Болотин В. А. Совершенствование методики расчета крепления колесной техники на открытом железнодорожном подвижном составе / В. А. Болотин, К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — № 1. — С. 183–196.
10. Протоdjьяконов М. М. Методика рационального планирования экспериментов / М. М. Протоdjьяконов, Р. И. Тедер. — М.: Наука, 1970. — 73 с.
11. Зубарев Ю. М. Применение методов теории планирования многофакторных экспериментов в технологии машиностроения / Ю. М. Зубарев, К. Н. Нечаев, В. И. Катенев и др. — СПб.: ПИМаш, 2000. — 130 с.
12. Зубарев Ю. М. Применение многофакторных экспериментов второго порядка в технологии машиностроения / Ю. М. Зубарев, К. Н. Нечаев, В. И. Катенев и др. — СПб.: ПИМаш, 2002. — 134 с.

Дата поступления: 04.06.2023

Решение о публикации: 12.07.2023

### Контактная информация:

БОЛОТИН Валерий Алексеевич — канд. техн. наук; [spb-vab@yandex.ru](mailto:spb-vab@yandex.ru)

ЯНКОВСКАЯ Наталья Григорьевна — канд. техн. наук; [spbng@rambler.ru](mailto:spbng@rambler.ru)

# The Influence of the Geometric Parameters of the Tie-Downs Placement on Their Bearing Capacity When Securing Wheeled Vehicles on a Railway Platform

V. A. Bolotin, N. G. Yankovskaya

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Bolotin V. A., Yankovskaya N. G. The Influence of the Geometric Parameters of Tie-Downs Placement on Their Bearing Capacity When Securing Wheeled Vehicles on a Railway Platform. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 18–31. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-18-31

## Summary

**Purpose:** The issues of securing wheeled vehicles on a universal railway platform are considered. In practice, the most common method is securing tie-downs around the axles of the wheeled vehicles. A study has been conducted to determine the optimal parameters of wire tie-downs depending on their placement on the freight. The conducted computational experiment has revealed that the applied place of fixing the tie-downs is not optimal. The influence of various factors on the number of nails for fixing the bumping posts securing the wheeled equipment has also been investigated.

**Methods:** The theory of planning a multifactorial experiment, methods of regression analysis are applied. **Results:** The influence of the geometric parameters of the placement of tie-downs on their bearing capacity has been established, provided that the wheeled equipment is secured from rolling.

**Practical significance:** The obtained research results allow us to choose the most rational points for fixing tie-downs on the frame of wheeled vehicles and the platform. The proposed method has been tested during the transportation of wheeled vehicles from the stations of the Oktyabrskaya Railway branch of JSC “Russian Railways”.

**Keywords:** Railway transport, open rolling stock, wheeled vehicles, securing, design scheme, multifactor experiment, Latin square, geometric parameters of the tie-downs placement.

## References

1. *Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya gruzov v vagonakh i konteynerakh* [Technical conditions for the placement and securing of goods in wagons and containers]. Moscow: Yurtrans Publ., 2003, 544 p. (In Russian)

2. *Prilozhenie 3 k SMGS “Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya gruzov”* [Appendix 3 to the SMGS “Technical conditions for the placement and fastening of goods”]. Available at: <http://osjd.org/doco/public/ru>. (In Russian)

3. Nutovich V. E. Tsifrovoye obespechenie i soblyudeniye tekhnicheskikh usloviy razmeshcheniya i krepleniya gruzov [Digital provision and compliance with the technical conditions for the placement and securing of goods]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2018, Iss. 4, pp. 52–59. (In Russian)

4. Gordienko A. A. *Matematicheskoe modelirovanie vzaimodeystviya shin kolesnoy tekhniki pri ee perezovozke i pola vagona. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Transport-2013"* [Mathematical modeling of the interaction of tires of wheeled vehicles during its transportation and the floor of the car. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Transport-2013"]. Rostov-on-Don: RSUPS Publ., 2013, pp. 283–285. (In Russian)

5. Gordienko A. A. *Razrabotka metodiki otsenki amplitud vertikal'nykh kolebaniy kolesnoy tekhniki, perezovozimoy na otkrytom podvizhnom sostave* [Development of a methodology for estimating the amplitudes of vertical vibrations of wheeled vehicles transported on open rolling stock]. *Transport: Nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: Science, Technology, management]. 2013, Iss. 5, pp. 64–68. (In Russian)

6. Turanov Kh. T., Pserovskaya E. D., Gordienko A. A. *Primer rascheta po novoy metodike gibkikh elementov krepleniya kolesnoy tekhniki pri vozdeystvii prodol'nykh si* [An example of calculation according to a new method of flexible fastening elements of wheeled vehicles under the influence of longitudinal forces]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. 2014, Iss. 4, pp. 50–57. (In Russian)

7. Sitnikov S. A. *Opredelenie ustoychivosti kolesnoy tekhniki, perezovozimoy na platforme pri nalichii gibkikh elementov krepleniya* [Determination of the stability of wheeled vehicles transported on a platform in the presence of flexible fastening elements]. *Byulleten' nauki i praktiki* [Bulletin of Science and Practice]. 2021, vol. 7, Iss. 8, pp. 253–263. (In Russian)

8. Turanov H. T., Ruzmetov Ya. O., Shikhnazarov Zh. A. *K raschetu krepleniya tverdotel'nogo gruzha pri vozdeystvii prodol'nykh sil* [To the calculation of the fastening of solid-state cargo under the influence of longitudinal forces]. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern problems of the transport complex of Russia]. 2020, vol. 10, Iss. 1, pp. 32–42. (In Russian)

9. Bolotin V. A., Kovalev K. E., Novichikhin A. V. et al. *Sovershenstvovanie metodiki rascheta krepleniya kolesnoy tekhniki na otkrytom zheleznodorozhnom podvizhnom sostave* [Improving the methodology for calculating the fastening of wheeled vehicles on open railway rolling stock]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2023, Iss. 1, pp. 183–196. (In Russian)

10. Protodiakonov M. M., Teder R. I. *Metodika ratsional'nogo planirovaniya eksperimentov* [Methods of rational planning of experiments]. Moscow: Nauka Publ., 1970, 73 p. (In Russian)

11. Zubarev Yu. M., Nechaev K. N., Katenev V. I. et al. *Primenenie metodov teorii planirovaniya mnogofaktornykh eksperimentov v tekhnologii mashinostroeniya* [Application of methods of the theory of planning multifactor experiments in mechanical engineering technology]. St. Petersburg: Pimash Publ., 2000, 130 p. (In Russian)

12. Zubarev Yu. M., Nechaev K. N., Katenev V. I. et al. *Primenenie mnogofaktornykh eksperimentov vtorogo poryadka v tekhnologii mashinostroenii* [Application of multifactorial experiments of the second order in mechanical engineering technology]. St. Petersburg: Pimash Publ., 2002, 134 p. (In Russian)

Received: June 04, 2023

Accepted: July 12, 2023

#### Author's information:

Valery A. BOLOTIN — PhD in Engineering; spb-vab@yandex.ru

Natalya G. YANKOVSKAYA — PhD in Engineering; spbng@rambler.ru

УДК 656.2

## Учет переменного характера расчетных нормативов плана формирования поездов с использованием технологий вычислительного интеллекта

А. П. Бадецкий, О. А. Медведь, Я. В. Кукушкина

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Бадецкий А. П., Медведь О. А., Кукушкина Я. В. Учет переменного характера расчетных нормативов плана формирования поездов с использованием технологий вычислительного интеллекта // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 32–45. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-32-45

### Аннотация

**Цель:** План формирования поездов является важнейшим логистическим инструментом управления перевозками грузов. Но использование при его разработке дискретных значений расчетных нормативов — затрат вагоно-часов на накопление составов и экономии от проследования вагонами технической станции без переработки — не всегда гарантируют оптимальность решения в силу объективно существующей неравномерности эксплуатационной работы. Именно она порождает неопределенность, которая не является стохастической по своей природе, и вызывает необходимость корректировок плана формирования на протяжении его жизненного цикла. Кроме колебаний вагонопотоков, она вызывает изменение и значений расчетных нормативов. Для управления такой неопределенностью существуют специальные методы, одним из которых является нечеткая логика. В статье описан способ учета изменения всех расчетных нормативов плана формирования поездов. **Методы:** Используются методы одной из технологий вычислительного искусственного интеллекта — нечеткая логика, нечеткие множества и нечеткая математика. **Результаты:** Установлена зависимость изменения расчетных параметров плана формирования поездов от колебаний вагонопотоков отдельных его назначений. Полученные на основе известных аналитических выражений формулы позволяют определять значения нормативов плана формирования без использования вспомогательных таблиц и графиков. **Практическая значимость:** Использование полученных зависимостей при разработке плана формирования позволит повысить точность его расчета за счет учета колебаний не только вагонопотоков, но и зависящих от них значений расчетных нормативов.

**Ключевые слова:** Вычислительный интеллект, нечеткие множества, колебания вагонопотоков, система организации вагонопотоков.

### Введение

В современных условиях цифровой трансформации железнодорожной отрасли важное значение приобретает использование для технических и технологических расчетов таких моделей и методов, которые в том числе могут работать с неточными, нечеткими и неопределенными данными, проявляя при этом вычислительную адаптивность и отказоустойчивость. Одной из технологий, в полной мере отвечающих данным требованиям, является вычислительный

интеллект (ВИ) [1–4]. Данное направление включает в себя целый ряд технологий искусственного интеллекта: искусственные нейронные сети (ИНС) во всем своем многообразии, теория нечеткой логики и ее всевозможные приложения и расширения (нечеткие множества, нечеткая математика), а также генетические алгоритмы (являющиеся, в свою очередь, одной из технологий эволюционного моделирования).

Применение ВИ для решения различных задач транспортной отрасли имеет свою историю как за рубежом [5–13], так и в нашей стране [14–18]. В данной статье обобщается применение теории нечетких множеств [19] для учета переменного характера вагонопотоков и зависящих от них затрат на накопление составов поездов [20–24], а также предлагается метод определения значений экономии вагоно-часов от проследования вагонами технической станции без переработки.

### Определение границ изменения вагонопотока в расчетный период

В поставленной задаче целесообразно рассматривать вагонопотоки отдельных назначений плана формирования поездов, так как они определяют и переменный характер других его расчетных параметров. Для этой цели могут использоваться нечеткие числа, являющиеся естественным расширением теории нечетких множеств.

Колебания вагонопотока  $U$  отдельного назначения ПФП можно описать нечетким треугольным числом. Оно представляет собой упорядоченную тройку вида  $U = (u_1, u_2, u_3)$ , функция принадлежности которого задается формулой:

$$\mu_A(U) = \begin{cases} 0, & u < u_1 \\ \left( \frac{u - u_1}{u_2 - u_1} \right), & u_1 \leq u \leq u_2 \\ \left( \frac{u_3 - u}{u_3 - u_2} \right), & u_2 \leq u \leq u_3 \\ 0, & u > u_3 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $u$  — определенное значение вагонопотока;

$u_2$  — наиболее ожидаемое значение вагонопотока в рассматриваемый период;

$u_1, u_3$  — соответственно нижняя и верхняя границы колебаний рассматриваемого вагонопотока.

С учетом того свойства вагонопотоков, что их изменение может быть спрогнозировано только с определенной степенью вероятности, для определения границ  $u_1, u_3$  используются следующие формулы:

$$u_1 = \frac{p(\bar{u})u_{\min} - p(u_{\min})\bar{u}}{p(\bar{u}) - p(u_{\min})},$$

$$u_3 = \frac{p(u_{\max})\bar{u} - p(\bar{u})u_{\max}}{p(u_{\max}) - p(\bar{u})},$$

где  $u_{\min}$ ,  $\bar{u}$ ,  $u_{\max}$  — соответственно минимальный, средний и максимальный вагонопоток рассматриваемого периода (возможна оценка с применением статистических данных);

$p(u_{\min})$ ,  $p(\bar{u})$ ,  $p(u_{\max})$  — вероятности возникновения минимальных, средних и максимальных вагонопотоков соответственно.

Строго говоря, при использовании для оценки границ колебаний вагонопотоков статистических данных за предыдущий период их представление может быть выражено также и нечетким трапецевидным числом.

### Определение границ изменения затрат вагоно-часов на накопление составов в зависимости от колебаний вагонопотока

В соответствии с Инструктивными указаниями по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД» параметр накопления отдельного назначения ПФП является функционалом от вагонопотока этого назначения и может быть выражен следующей формулой:

$$c_i = 12 \left( 1 - \frac{Bm_p \sqrt{U_i}}{(3,1 + 0,014U_i)km_i} \right), \quad (2)$$

где  $B$  — коэффициент, зависящий от допустимых колебаний числа вагонов в составах рассматриваемого назначения, для среднесетевых условий;

$m_p$ ,  $m_i$  — норма состава соответственно расформировываемых на станции поездов и формируемых на  $i$ -е назначение;

$U_i$  — вагонопоток рассматриваемого назначения;

$k$  — количество назначений, формируемых станцией.

Зависимость, представленная формулой (2), позволяет построить нечеткое представление параметра накопления двумя способами:

**1. Графический способ.** Для его применения необходимо построить график зависимости затрат вагоно-часов на накопление составов поездов от вагонопотока назначения. Нечеткое число  $ct = (ct_1, ct_2, ct_3)$  является проекцией нечеткого числа  $U = (u_1, u_2, u_3)$  на ось затрат вагоно-часов, как показано на рис. 1.

Несмотря на кажущуюся простоту данного способа, стоит отметить ряд его недостатков, которые могут привести к неверной интерпретации результатов:

– зависимость  $ct = f(U)$  на самом деле является семейством кривых, и их расположение относительно оси затрат на накопление зависит от нормы длины формируемых составов поездов  $t$ , что в каждом отдельном случае требует построения новой кривой для каждого  $t$ ;

– как можно видеть из примера на рис. 1, проекция, отражающая нечеткие затраты на накопление, в силу того, что функция  $ct = f(U)$  является вогнутой, а не монотонной. Вследствие этого может возникнуть ситуация, когда нечеткое число  $ct$  не отражает сути нечеткого числа  $U$ . В примере наиболее ожидаемым значением вагонопотока является  $u_2$ , и значение функции принадлежности в этой точке равно 1 (т. е. элемент  $u_2$  является типовым элементом данного множества), тогда как затраты на накопление, соответствующие данному вагонопотоку, имеют степень принадлежности к множеству  $ct$ , равную 0 (т. е.  $ct_1$  не является элементом множества  $ct$ ). И, наоборот  $ct_2$  имеет степень принадлежности 1, тогда как значение вагонопотока  $u_3$  в данном примере недостижимо (степень принадлежности равна 0). Поэтому построенное таким образом нечеткое число требует корректировки в ручном режиме. В рассмотренном примере степени принадлежности элементов  $ct_1$  и  $ct_2$  нечеткому множеству  $ct$  были бы равны 0, а элемента  $ct_3$  — 1, что повлияло бы на форму нечеткого числа и значения функции принадлежности его промежуточных элементов.

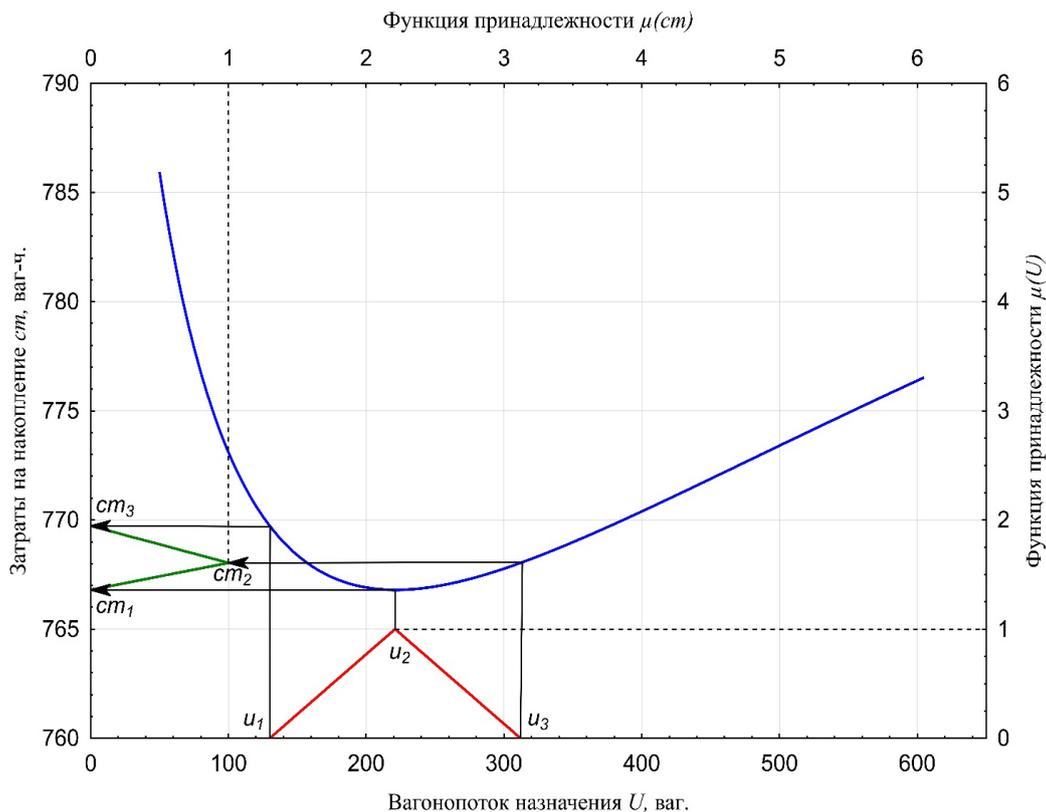


Рис. 1. Графический способ определения нечеткого числа, характеризующего изменение затрат на накопление составов поездов

**2. Расчетный способ.** По сравнению с графическим, позволяет более точно определить степень принадлежности отдельных элементов нечеткому множеству  $c$ . Нечеткий параметр накопления  $c = (c_1, c_2, c_3)$  представляется функцией принадлежности формы (1), где границы  $c_1, c_2$  и  $c_3$  определяются в соответствии с формулой (2):

$$\mu(c) = \begin{cases} 0, & c < c_1 \\ 12 \left( 1 - \frac{Bm_p \sqrt{u}}{(3,1 - 0,014u)km_i} \right) - 12 \left( 1 - \frac{Bm_p \sqrt{u_1}}{(3,1 - 0,014u_1)km_i} \right), & c_1 \leq c \leq c_2 \\ 12 \left( 1 - \frac{Bm_p \sqrt{u_2}}{(3,1 - 0,014u_2)km_i} \right) - 12 \left( 1 - \frac{Bm_p \sqrt{u_1}}{(3,1 - 0,014u_1)km_i} \right), & c_1 \leq c \leq c_2 \\ 12 \left( 1 - \frac{Bm_p \sqrt{u_3}}{(3,1 - 0,014u_3)km_i} \right) - 12 \left( 1 - \frac{Bm_p \sqrt{u}}{(3,1 - 0,014u)km_i} \right), & c_2 \leq c \leq c_3 \\ 12 \left( 1 - \frac{Bm_p \sqrt{u_3}}{(3,1 - 0,014u_3)km_i} \right) - 12 \left( 1 - \frac{Bm_p \sqrt{u_2}}{(3,1 - 0,014u_2)km_i} \right), & c_2 \leq c \leq c_3 \\ 0, & c > c_3 \end{cases}$$

и, после математических преобразований, примет вид:

$$\mu(c) = \begin{cases} 0, & c < c_1 \\ \frac{(\sqrt{u_1} - \sqrt{u})(3,1 - 0,014\sqrt{uu_1})(3,1 + 0,014u_2)}{(\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2})(3,1 - 0,014\sqrt{u_1u_2})(3,1 + 0,014u)}, & c_1 \leq c \leq c_2 \\ \frac{(\sqrt{u} - \sqrt{u_3})(3,1 - 0,014\sqrt{uu_3})(3,1 + 0,014u_2)}{(\sqrt{u_2} - \sqrt{u_3})(3,1 - 0,014\sqrt{u_2u_3})(3,1 + 0,014u)}, & c_2 \leq c \leq c_3 \\ 0, & c > c_3 \end{cases} \quad (3)$$

Из формулы (3) можно сделать следующий вывод — при рассмотрении параметра накопления отдельно по каждому назначению плана формирования поездов его значение зависит только от колебаний вагонопотока соответствующего назначения, что значительно упрощает его нахождение относительно формулы (2).

Чтобы определить затраты вагоно-часов на накопление составов поездов по второму способу, получившееся в результате расчета нечеткое число, характеризующее изменение параметра накопления, необходимо умножить на норму

длины формируемых станцией составов поездов данного назначения. В соответствии с правилами нечеткой математики, результатом будет также нечеткое число  $ct = (ct_1, ct_2, ct_3)$ , где  $t$  является константой, а нижние индексы относятся к параметру накопления.

### Определение границ изменения экономии вагоно-часов на проследование вагонами технической станции без переработки в зависимости от колебаний вагонопотока

В общем случае экономия от проследования вагонами технической станции без переработки  $t_{\text{эк}}$  определяется следующим образом:

$$t_{\text{эк}} = \frac{B_{\text{эк}}}{\Delta n_{\text{пер}}} = \frac{B_{\text{эк}}}{n_{\text{пер},i} - n_{\text{пер},j}}, \quad (4)$$

где  $\Delta n_{\text{пер}}$  — разница между количеством перерабатываемых станцией составов до выделения струи вагонопотока в поездное назначение  $n_{\text{пер},i}$  и после  $n_{\text{пер},j}$ ;  
 $B_{\text{эк}}$  — экономия вагоно-часов при выделении струи вагонопотока в отдельное назначение плана формирования:

$$B_{\text{эк}} = \left[ n_{\text{пер},i} (t_{\text{пер},i} - t_{\text{нак},i}) - n_{\text{пер},j} (t_{\text{пер},j} - t_{\text{нак},j}) \right] - (n_{\text{пер},i} - n_{\text{пер},j}) t_{\text{тр}} = n_{\text{пер},i} t_{\text{эк},i}^i - n_{\text{пер},j} t_{\text{эк},j}^j, \quad (5)$$

где  $t_{\text{пер},i}$ ,  $t_{\text{пер},j}$  — время нахождения на станции вагона с переработкой при объемах переработки станции  $n_{\text{пер},i}$  и  $n_{\text{пер},j}$  соответственно;  
 $t_{\text{нак},i}$ ,  $t_{\text{нак},j}$  — время на накопление составов поездов при объемах переработки станции  $n_{\text{пер},i}$  и  $n_{\text{пер},j}$  соответственно;  
 $t_{\text{эк},i}^o$ ,  $t_{\text{эк},j}^o$  — расчетное время нахождения вагона на станции (в сортировочной системе) при объемах переработки  $n_{\text{пер},i}$  и  $n_{\text{пер},j}$  соответственно.

Как следует из формулы (5),  $t_{\text{эк}}^o$  определяется как разность расчетных времен нахождения на станции (или в сортировочной системе) вагона с переработкой, исключая простой под накоплением,  $t_{\text{пер}}$  и транзитного вагона  $t_{\text{тр}}$  при изменении вагонопотока в случае его выделения в поездное назначение и является функцией от количества перерабатываемых станцией составов  $t_{\text{эк}}^o = f(n_{\text{пер}})$ , которое, в свою очередь, является функцией от объема перерабатываемого вагонопотока:  $n_{\text{пер}} = f(U)$ . С учетом этого можно сделать вывод, что величина параметра  $t_{\text{эк}}$  зависит от размеров выделяемого в поездное назначение вагонопотока и сама по себе является величиной динамической, что наглядно демонстрирует выражение (4).

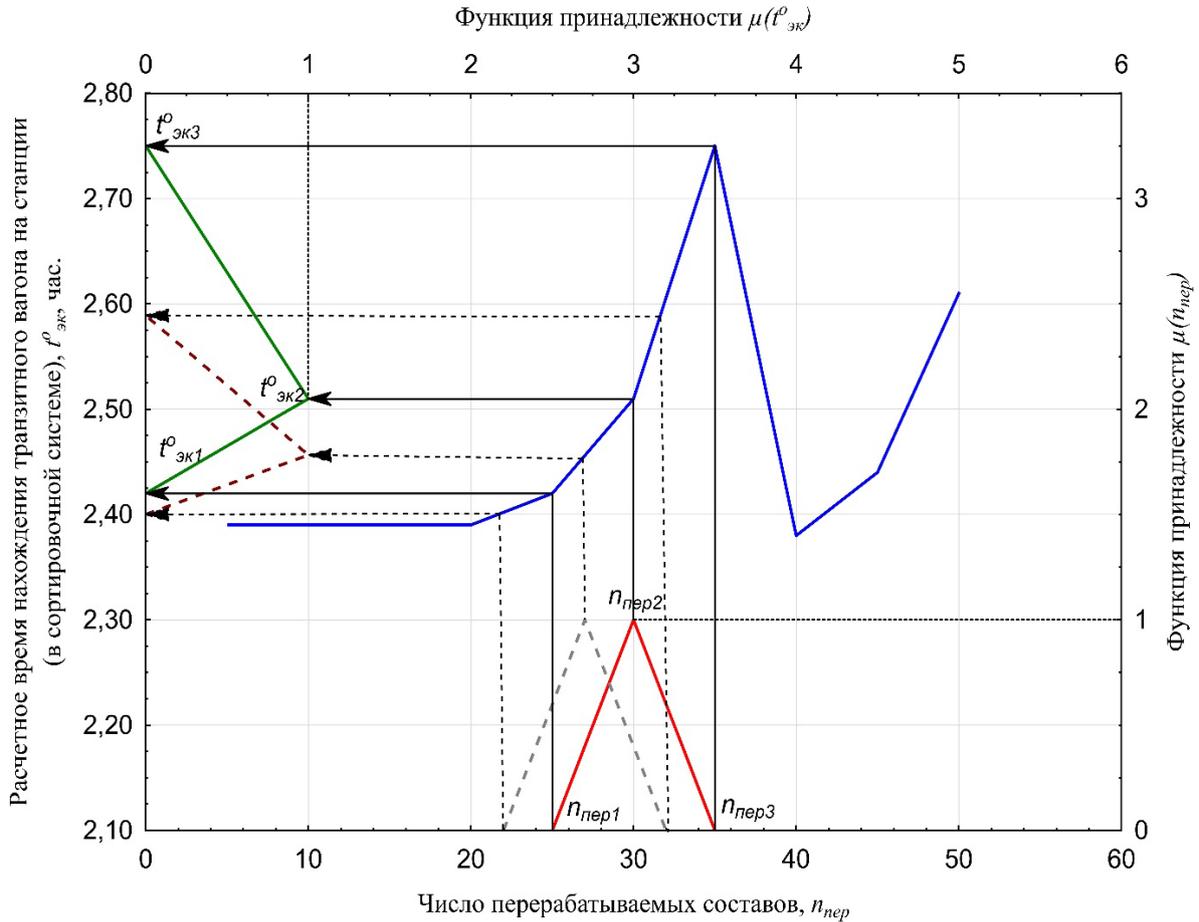


Рис. 2. Определение нечетких чисел, характеризующих изменение расчетного времени нахождения транзитного вагона на станции (в сортировочной системе) при снижении объемов переработки

Вместе с тем переменный характер  $t_{\text{эк}}$  требует большего объема вычислений для нахождения нечеткого числа, характеризующего его изменения, чем параметр накопления, и найти его только графическим или только расчетным способом невозможно.

В связи с этим предлагается комбинированный метод нахождения нечеткой экономии от проследования вагонами транзитной станции без переработки, который заключается в следующем. Для станции, по которой планируется пропуск дополнительного транзитного вагонопотока за счет выделения его в самостоятельное поездное назначение, определяются объемы переработки до принятия такого решения. С учетом колебаний размеров вагоно- и поездопотоков результатом будет нечеткое число  $n_{\text{пер},i} = (n_{\text{пер},i1}, n_{\text{пер},i2}, n_{\text{пер},i3})$ , как показано на рис. 2. Нечеткое число  $t_{\text{эк},i}^o = (t_{\text{эк},i1}^o, t_{\text{эк},i2}^o, t_{\text{эк},i3}^o)$  является результатом проецирования  $n_{\text{пер},i}$  на ось расчетного времени нахождения транзитного вагона на станции (в сортировочной системе).

Затем необходимо построить еще два нечетких числа, характеризующих объемы переработки станции после выделения рассматриваемой струи в поездное

назначение  $n_{пер,j}$  и соответствующее ему расчетное время нахождения вагона на станции  $t_{эк,j}^o$ . Для этого необходимо перейти от числа составов к количеству вагонов, перерабатываемых станцией. В результате получатся два нечетких числа, которые для простоты в тексте будем обозначать  $\sum U_i$  и  $\sum U_j$ :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n U_i &= \left( \sum_{i=1}^n u_{i1}, \sum_{i=1}^n u_{i2}, \sum_{i=1}^n u_{i3} \right) = (n_{пер.i1}m, n_{пер.i2}m, n_{пер.i3}m); \\ \sum_{j=1}^k U_j &= \left( \sum_{j=1}^k u_{j1}, \sum_{j=1}^k u_{j2}, \sum_{j=1}^k u_{j3} \right) = (n_{пер.j1}m, n_{пер.j2}m, n_{пер.j3} \cdot m), \end{aligned} \tag{6}$$

где  $i = 1, \dots, n$  — количество назначений, формируемых станцией до выделения струи вагонопотока в отдельное назначение ПФП;

$j = 1, \dots, k$  — количество назначений, формируемых станцией после выделения струи вагонопотока в отдельное назначение ПФП;

$\sum U_i$  — сумма вагонопотоков всех назначений, формируемых станцией до выделения струи вагонопотока в отдельное назначение ПФП;

$\sum U_j$  — сумма вагонопотоков всех назначений, формируемых станцией после выделения струи вагонопотока в отдельное назначение ПФП.

С учетом уже имеющейся информации о колебаниях вагонопотока выделяемого назначения плана формирования  $U$ ,  $\sum U_i$  и  $\sum U_j$  связаны между собой следующим выражением:

$$\sum_{j=1}^k U_j = \sum_{i=1}^n U_i - U = \left( \sum_{i=1}^n u_{i1} - u_1, \sum_{i=1}^n u_{i2} - u_2, \sum_{i=1}^n u_{i3} - u_3 \right). \tag{7}$$

Исходя из формулы (7) определяется нечеткое число  $n_{пер,j}$ , а соответствующее ему НТЧ  $t_{эк,j}^o$ , как и в случае с затратами на накопление составов, представляет собой проекцию на ось расчетного времени нахождения вагона на станции или в сортировочной системе (оба числа показаны штриховыми линиями на рис. 2). Тогда, согласно формулам (6) и (7), выражения (4) и (5) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} B_{эк} &= \sum_{i=1}^n U_i t_{эк,i}^o - \sum_{j=1}^k U_j t_{эк,j}^o = \sum_{i=1}^n U_i t_{эк,i}^o - \left( \sum_{i=1}^n U_i - U \right) t_{эк,j}^o = \\ &= \sum_{i=1}^n U_i (t_{эк,i}^o - t_{эк,j}^o) + U t_{эк,j}^o = \sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{эк}^o + U t_{эк,j}^o \end{aligned} \tag{8}$$

$$t_{эк} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{эк}^o - U t_{эк,j}^o}{\sum_{i=1}^n U_i - \sum_{j=1}^k U_j} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{эк}^o - U t_{эк,j}^o}{U}, \tag{9}$$

где  $\Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} = t_{\text{ЭК},i}^{\circ} - t_{\text{ЭК},j}^{\circ}$  — величина, показывающая, насколько изменилось расчетное время нахождения вагона на станции для всего перерабатываемого ею вагонопотока. При этом следует учесть, что все величины, представленные в формулах (8) и (9), являются нечеткими числами.

Принимая во внимание (8) и (9), функция принадлежности нечеткого числа, характеризующего изменение экономии времени от проследования вагонами технической станции без переработки, примет вид:

$$t_{\text{ЭК}} = \begin{cases} 0, u < u_1 \\ \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - ut_{\text{ЭК},j}^{\circ}}{u} - \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - u_1 t_{\text{ЭК},j1}^{\circ}}{u_1}, u_1 \leq u \leq u_2 \\ \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - u_2 t_{\text{ЭК},j2}^{\circ}}{u_2} - \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - u_1 t_{\text{ЭК},j1}^{\circ}}{u_1}, u_1 \leq u \leq u_2 \\ \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - u_3 t_{\text{ЭК},j3}^{\circ}}{u_3} - \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - ut_{\text{ЭК},j}^{\circ}}{u}, u_2 \leq u \leq u_3 \\ \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - u_3 t_{\text{ЭК},j3}^{\circ}}{u_3} - \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - u_2 t_{\text{ЭК},j2}^{\circ}}{u_2}, u_2 \leq u \leq u_3 \\ 0, u > u_3 \end{cases} \quad (10)$$

и, после математических преобразований:

$$t_{\text{ЭК}} = \begin{cases} 0, u < u_1 \\ \frac{u_2 \left( \sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} (u - u_1) + uu_1 (t_{\text{ЭК},j}^{\circ} - t_{\text{ЭК},j1}^{\circ}) \right)}{u \left( \sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} (u_2 - u_1) + u_1 u_2 (t_{\text{ЭК},j2}^{\circ} - t_{\text{ЭК},j1}^{\circ}) \right)}, u_1 \leq u \leq u_2 \\ \frac{u_2 \left( \sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} (u_3 - u) + uu_3 (t_{\text{ЭК},j3}^{\circ} - t_{\text{ЭК},j}^{\circ}) \right)}{u \left( \sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} (u_3 - u_2) + u_2 u_3 (t_{\text{ЭК},j3}^{\circ} - t_{\text{ЭК},j2}^{\circ}) \right)}, u_2 \leq u \leq u_3 \\ 0, u > u_3 \end{cases} \quad (11)$$

## Заключение

Представленный в статье метод учета переменного характера расчетных нормативов плана формирования поездов обладает всеми свойствами, присущими алгоритмам вычислительного интеллекта. Эти свойства позволяют при разработке плана формирования поездов, в отличие от расчета с использованием дискретных значений, получать решения, устойчивые к колебаниям вагонопотоков, а также зависящим от них параметров плана формирования поездов.

## Библиографический список

1. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — 452 с.
2. Siddique N. Computational intelligence: synergies of fuzzy logic, neural network and evolutionary computing / N. Siddique, H. Adeli. — John Wiley & Sons, Ltd, 2013. — 517 p.
3. Shukla A. Computational intelligence / A. Shukla, B. K. Murthy, N. Hasteer et al. // Lecture Notes in Electrical Engineering. — 2022— Vol. 968. — Pp. 1876–1119. — DOI: 10.1007/978-981-19-7346-8.
4. Eberhart R. C. Computational Intelligence: Concepts to Implementations / R. C. Eberhart, Y. Shi. — Elsevier, 2011. — 496 p.
5. Xiao J. Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan / J. Xiao, B. Lin // Journal of Rail Transport Planning & Management. — 2016. — DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.09.002.
6. Yaghini M. Solving railroad blocking problem using ant colony optimization algorithm / M. Yaghini, A. Foroughi, B. Nadjari // Applied Mathematical Modelling. — 2011— Vol. 35. — Pp. 5579–5591. — DOI: 10.1016/j.apm.2011.05.018.
7. Yaghini M. A fuzzy railroad blocking model with genetic algorithm solution approach for Iranian railways / M. Yaghini, M. Momeni, M. Sarmadi et al. // Applied Mathematical Modelling. — 2015. — Vol. 39. — Pp. 6114–6125. — DOI: 10.1016/j.apm.2015.01.052.
8. Milenković M. A fuzzy random model for rail freight car fleet sizing problem / M. Milenković, N. Bojović // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — Vol. 33, August 2013. — DOI: 10.1016/j.trc.2013.05.003.
9. Yang L. Railway freight transportation planning with mixed uncertainty of randomness and fuzziness / L. Yang, Z. Gao, K. Li // Applied Soft Computing, January 2011. — Vol. 11. — Iss. 1. — DOI: 10.1016/j.asoc.2009.12.039.
10. Schneider M. Minimising economic losses due to inefficient rescheduling / M. Schneider, N. Nießen // Journal of Rail Transport Planning & Management. — 2016. — DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.05.002.
11. Yang Z. Semi-active Control of High-speed Trains Based on Fuzzy PID Control / Z. Yang, J. Zhang, Z. Chen et al. // Procedia Engineering. — 2011. — Vol. 15. — Pp. 521–525. — DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.099.

12. Teodorovic D. Traffic control and transport planning: a fuzzy sets and neural network approach / D. Teodorovic, K. Vukadinovic. — Kluwer Academic Publishers Group, 1998. — 387 p.
13. Teodorovic D. Transportation Engineering: Theory, Practice and Modeling / D. Teodorovic, M. Janic. — Butterworth-Heinemann, 2016. — 900 p.
14. Dolgopolov P. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms / P. Dolgopolov, D. Konstantinov, L. Rybalchenko et al. // *Procedia Computer Science*. — 2019. — Vol. 149. — Pp. 11–18. — DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.
15. Alekseychik T. The choice of transport for freight and passenger traffic in the region, using econometric and fuzzy modeling / T. Alekseychik, T. Bogachev, V. Bogachev et al. // *Procedia Computer Science*. — 2017. — Vol. 120. — Pp. 830–834. — DOI: 10.1016/j.procs.2017.11.314.
16. Badetskii A. P. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work / A. P. Badetskii, O. A. Medved // *Transportation Research Procedia*, Novosibirsk, 2021. — Pp. 559–567. — DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.
17. Кукушкина Я. В. Зависимость величины переходящего остатка от накопления смежных составов / Я. В. Кукушкина // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2010. — № 3(24). — С. 132–140.
18. Панков А. Н. О составообразовании на сортировочных станциях / А. Н. Панков, В. А. Кудрявцев, Я. В. Кукушкина и др. // *Железнодорожный транспорт*. — 2016. — № 3. — С. 45–50.
19. Zadeh L. A. Fuzzy Sets / L. A. Zadeh // *Information and Control*. — 1965. — Vol. 8. — Pp. 338–353.
20. Бадецкий А. П. Использование самонастраивающихся нечетких моделей для принятия решений о корректировке назначений плана формирования поездов / А. П. Бадецкий, О. А. Медведь // *Транспорт России: проблемы и перспективы — 2016: материалы международной научно-практической конференции*. — СПб.: ИПТРАН, 2016. — С. 221–224.
21. Осьминин А. Т. Модуль оперативной корректировки назначений плана формирования поездов / А. Т. Осьминин, И. И. Осьминина, А. П. Бадецкий и др. // *Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2016): труды пятой научно-технической конференции*. — М.: НИИАС, 2016. — С. 86–89.
22. Кудрявцев В. А. Учет колебаний вагонопотоков при расчете плана формирования поездов / В. А. Кудрявцев, А. П. Бадецкий // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2012. — № 3. — С. 10–16.
23. Бадецкий А. П. Применение переменных нормативов в расчете плана формирования поездов как способ учета неравномерности вагонопотоков / А. П. Бадецкий // *Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019): труды восьмой научно-технической конференции*. — М.: НИИАС, 2019. — С. 123–126.
24. Бадецкий А. П. Разработка расчетных вагонопотоков плана формирования поездов с учетом их неравномерности / А. П. Бадецкий // *Вестник транспорта Поволжья*. — 2013. — № 3. — С. 53–60.

Дата поступления: 27.07.2023

Решение о публикации: 20.08.2023

**Контактная информация:**

БАДЕЦКИЙ Александр Петрович — канд. техн. наук, доц.; badetsklii@pgups.ru

МЕДВЕДЬ Оксана Анатольевна — канд. техн. наук, доц.; oa.medved@yandex.ru

КУКУШКИНА Яна Васильевна — канд. техн. наук, доц.; kukushkina@pgups.ru

## Taking into Account the Variable Nature of the Calculation Standards of the Train Formation Plan Using Computational Intelligence Technologies

A. P. Badetsky, O. A. Medved, Ya. V. Kukushkina

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Badetsky A. P., Medved O. A., Kukushkina Ya. V. Taking into Account the Variable Nature of the Calculation Standards of the Train Formation Plan Using Computational Intelligence Technologies. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 32–45. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-32-45

### Summary

**Purpose:** The train formation plan is the most important logistics tool for cargo transportation management. But the use of discrete values of design standards in its development — the quantity of car-hours for the accumulation of trains and savings from passing of cars through technical station without processing — do not always guarantee the optimal solution due to the objectively existing unevenness of operational work. It is precisely this factor that generates uncertainty, which is not inherently stochastic, and necessitates adjustments to the train formation plan throughout its lifecycle. In addition to fluctuations in car traffic, it causes a change in the values of the calculated standards. To manage such uncertainty, there are special methods, one of which is fuzzy logic. The article describes a way to account for changes in all calculation standards of the train formation plan. **Methods:** The methods of one of the technologies of computational artificial intelligence are used — fuzzy logic, fuzzy sets and fuzzy mathematics. **Results:** The dependence has been established on how changes in the calculated parameters of the train formation plan are affected by fluctuations in car flows on specific destinations. The formulas obtained on the basis of known analytical expressions allow us to determine the values of the standards of the formation plan without using auxiliary tables and graphs. **Practical significance:** The use of the obtained dependencies in the development of the formation plan will improve the accuracy of its calculation by taking into account fluctuations not only of car traffic, but also the values of the calculated standards depending on them.

**Keywords:** Computational intelligence, fuzzy sets, fluctuations of car traffic, the system of car traffic organization.

## References

1. Rutkovskaya D., Pilinsky M., Rutkovsky L. *Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow: Goryachaya liniya — Telekom Publ., 2006, 452 p. (In Russian)
2. Siddique N., Adeli H. Computational intelligence: synergies of fuzzy logic, neural network and evolutionary computing. John Wiley & Sons, Ltd, 2013, 517 p.
3. Shukla A., Murthy B. K., Hasteer N. et al. Computational intelligence. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2022, vol. 968, pp. 1876–1119. DOI: 10.1007/978-981-19-7346-8.
4. Eberhart R. C., Shi Y. Computational Intelligence: Concepts to Implementations. Elsevier, 2011, 496 p.
5. Xiao J., Lin B. Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2016. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.09.002.
6. Yaghini M., Foroughi A., Nadjari B. Solving railroad blocking problem using ant colony optimization algorithm. Applied Mathematical Modelling, 2011, vol. 35, pp. 5579–5591. DOI: 10.1016/j.apm.2011.05.018.
7. Yaghini M., Momeni M., Sarmadi M. et al. A fuzzy railroad blocking model with genetic algorithm solution approach for Iranian railways. Applied Mathematical Modelling, 2015, vol. 39, pp. 6114–6125. DOI: 10.1016/j.apm.2015.01.052.
8. Milenković M., Bojović N. A fuzzy random model for rail freight car fleet sizing problem. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 33, August 2013. DOI: 10.1016/j.trc.2013.05.003.
9. Yang L., Gao Z., Li K. Railway freight transportation planning with mixed uncertainty of randomness and fuzziness. Applied Soft Computing, January 2011, vol. 11, Iss. 1. DOI: 10.1016/j.asoc.2009.12.039.
10. Schneider M., Nießen N. Minimising economic losses due to inefficient rescheduling. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2016. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.05.002.
11. Yang Z., Zhang J., Chen Z. et al. Semi-active Control of High-speed Trains Based on Fuzzy PID Control. Procedia Engineering, 2011, vol. 15, pp. 521–525. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.099.
12. Teodorovic D., Vukadinovic K. Traffic control and transport planning: a fuzzy sets and neural network approach. Kluwer Academic Publishers Group, 1998, 387 p.
13. Teodorovic D., Janic M. Transportation Engineering: Theory, Practice and Modeling. Butterworth-Heinemann, 2016, 900 p.
14. Dolgoplov P., Konstantinov D., Rybalchenko L. et al. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms. Procedia Computer Science, 2019, vol. 149, pp. 11–18. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.
15. Alekseychik T., Bogachev T., Bogachev V. et al. The choice of transport for freight and passenger traffic in the region, using econometric and fuzzy modeling. Procedia Computer Science. 2017, vol. 120, pp. 830–834. DOI: 10.1016/j.procs.2017.11.314.
16. Badetskii A. P., Medved O. A. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work. Transportation Research Procedia, Novosibirsk, 2021, pp. 559–567. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.
17. Kukushkina Ya. V. Zavisimost' velichiny perekhodyashchego ostatka ot nakopleniya smezhnykh sostavov [Dependence of the value of the carry-over balance on the accumulation of

adjacent trains]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2010, Iss. 3(24), pp. 132–140. (In Russian)

18. Pankov A. N., Kudryavtsev V. A., Kukushkina Ya. V. O sostavoobrazovanii na sortirovochnykh stantsiyakh [About composition formation at marshalling yards]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2016, Iss. 3, pp. 45–50. (In Russian)

19. Zadeh L. A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8, pp. 338–353.

20. Badetskiy A. P., Medved' O. A. *Ispol'zovanie samonastravayushchikhsya nechetkikh modeley dlya prinyatiya resheniy o korrektyrovke naznacheniy plana formirovaniya poezdov. Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2016: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Use of self-adjusting fuzzy models for making decisions on adjusting the assignments of the train formation plan. Transport of Russia: problems and prospects — 2016: materials of the international scientific and practical conference]. Saint Petersburg: IPTRAN Publ., 2016, pp. 221–224. (In Russian)

21. Os'minin A. T., Os'minina I. I., Badetskiy A. P. *Modul' operativnoy korrektyrovki naznacheniy plana formirovaniya poezdov. Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2016): trudy pyatoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Module for operational adjustment of train formation plan assignments. Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2016): proceedings of the fifth scientific and technical conference]. Moscow: NIIAS Publ., 2016, pp. 86–89. (In Russian)

22. Kudryavtsev V. A., Badetskiy A. P. Uchet kolebaniy vagonopotokov pri raschete plana formirovaniya poezdov [Taking into account fluctuations in car flows when calculating the train formation plan]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2012, Iss. 3, pp. 10–16. (In Russian)

23. Badetskiy A. P. *Primenenie peremennykh normativov v raschete plana formirovaniya poezdov kak sposob ucheta neravnomernosti vagonopotokov. Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2019): trudy vos'moy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Application of variable standards in calculating the train formation plan as a way to take into account the unevenness of car flows. Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2019): proceedings of the eighth scientific and technical conference]. Moscow: NIIAS Publ., 2019, pp. 123–126. (In Russian)

24. Badetskiy A. P. *Razrabotka raschetnykh vagonopotokov plana formirovaniya poezdov s uchedom ikh neravnomernosti* [Development of calculated car flows of the train formation plan taking into account their unevenness]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region]. 2013, Iss. 3, pp. 53–60. (In Russian)

Received: July 27, 2023

Accepted: August 20, 2023

#### Author's information:

Alexander P. BADETSKII — PhD in Engineering, Associate Professor; badetskii@pgups.ru

Oksana A. MEDVED — PhD in Engineering, Associate Professor; oa.medved@yandex.ru

Yana V. KUKUSHKINA — PhD in Engineering, Associate Professor; kukushkina@pgups.ru

УДК 656.07+06

## Развитие узловой терминально-складской инфраструктуры: модификация методов исследования и прогнозы

О. Н. Числов<sup>1</sup>, В. А. Богачев<sup>1</sup>, В. В. Трапенов<sup>1</sup>, Т. В. Богачев<sup>2</sup>, В. М. Задорожний<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

<sup>2</sup>Ростовский государственный экономический университет, Российская Федерация, 344002, Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 69

**Для цитирования:** Числов О. Н., Богачев В. А., Трапенов В. В., Богачев Т. В., Задорожний В. М. Развитие узловой терминально-складской инфраструктуры: модификация методов исследования и прогнозы // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 46–57. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-46-57

### Аннотация

**Цель:** Развитие экономико-географического метода в нахождении оптимальных местоположений логистических грузовых распределительных центров на рассматриваемой территории и его применение к построению геометрической маршрутизационной модели распределения грузопотоков. **Методы:** Экономико-географический метод разделения «областей влияния» субъектов перевозочного процесса. Статистические методы обработки эмпирических данных. Метод Монте-Карло. **Результаты:** Разработана геометрическая маршрутизационная модель распределений грузопотоков, образуемых субъектами перевозочного процесса, конкурирующими на территориальном олигополистическом рынке грузоперевозок. **Практическая значимость:** Построенная модель позволяет адекватно имеющейся транспортной сети находить «области влияния» субъектов перевозочного процесса, рассматриваемых в качестве олигополистов на региональном рынке грузоперевозок.

**Ключевые слова:** Транспортный узел, распределение грузопотоков, экономико-географический метод, геометрическая маршрутизационная модель, «области влияния» логистических терминалов.

### Введение

Складские помещения большого формата продолжают оставаться выгодным объектом для инвесторов, поскольку сдача их в аренду способна принести до 15 % дохода в год. Эксперты торговой индустрии и логистических компаний Retail Loyalty сделали заключение о том, что в начале 2022 г. значительно снизились цены аренды складских помещений, предназначенных для непродовольственных товаров, и эта тенденция сохраняется. В 2022 г. российский рынок складской недвижимости претерпел существенные изменения из-за ужесточения внешних санкций, ухода из бизнеса иностранных компаний и в целом быстро меняющейся экономической ситуации.

Объем предложений качественной складской недвижимости в столице России показал максимальное значение за последние 8 лет и составил порядка 1,6 млн м<sup>2</sup>,

а общий показатель по стране достиг 41 млн м<sup>2</sup>. Также отмечается интерес к региональным проектам развития складской инфраструктуры, где объем сделок вырос почти в 3 раза. По данным Knight Frank, без учета Москвы и Санкт-Петербурга в России прошли сделки с 600 тыс. м<sup>2</sup> складских площадей, что более чем в 2 раза выше показателя за 2018 г. По данным C&W, всего в регионах было арендовано и куплено 995 тыс. м<sup>2</sup> складов класса А и В, «спрос достиг 10-летнего максимума». Одним из лидеров по числу заключенных новых сделок является город Ростов-на-Дону — более 107 тыс. м<sup>2</sup> проектов складской недвижимости.

При этом на первый план выходит проблема рационального размещения новых складов на территории транспортных узлов, определение рациональных параметров уже существующих складов с учетом включения их в транспортно-логистические цепи поставок товаров. Таким образом, актуальна задача, состоящая в развитии существующих и разработке новых математических подходов в моделировании складской сети и определении эффективных схем распределения узловых грузопотоков с учетом степени использования складской составляющей.

Приведем краткий обзор ряда работ, посвященных современным вопросам оптимизации функционирования складской недвижимости в РФ.

В [1] решается задача нахождения местоположений логистических центров на обслуживаемой территории двумя методами. В первом случае находится «центр тяжести» грузопотоков, когда основным фактором, влияющим на выбор местоположения центра, является размер затрат на доставку товаров потребителям. Во втором случае осуществляется частичный перебор узлов транспортной сети, позволяющий найти узел, размещение в котором логистического центра обеспечивает минимум грузооборота по обслуживаемой транспортной сети. Решению задачи нахождения местоположений распределительных центров с использованием метода «центра тяжести» посвящены также работы [2–4].

В [5] предлагается решение задачи о размещении логистических центров на основе сетевой транспортной задачи с использованием теории графов.

В [6, 7] рассматриваются вопросы конфигурирования терминально-складской инфраструктуры в отношении размещения складских мощностей в транспортном узле. Разработана оптимизационная геометрическая евклидова модель процесса грузоперевозок, в которой значениями подлежащей максимизации целевой функции являются площади «областей влияния» распределительных центров.

Проведенный анализ показывает, что вопросы, относящиеся к размещению логистических грузовых распределительных центров (ЛГРЦ) на территории транспортных узлов, весьма актуальны с практической точки зрения и рассматриваемые в комплексе составляют разностороннюю и многоцелевую оптимизационную задачу. Переходя непосредственно к предмету настоящего исследования, отметим, что во всей мировой практике из соображений оптимизации ЛГРЦ располагаются «по периметру границ» мегаполисов. Для России, которая

не составляет исключения, характерна еще и локализация ЛГРЦ возле основных федеральных транспортных артерий на подходе к крупным городам. Если исходить из общих логистических соображений, то автотранспорту целесообразнее доставлять импортный и отечественный грузы в ЛГРЦ (не загружая перевозками город), а затем в виде отдельного преобразующего звена логистической цепи выполнять грузоперевозки по городской территории.

### Анализ транспортно-логистической ситуации и обоснование целесообразности построения ГММ

Экономико-географический метод разграничения «областей влияния» субъектов перевозочного процесса позволяет (в соответствии со стоимостями перевозок в пункты назначения) получить территориальную картину распределения грузопотоков в рассматриваемом регионе. Результатом выполнения аналитических и геометрических построений является *геометрическая евклидова модель (ГЕМ)* соответствующего олигополистического рынка грузоперевозок.

Как отмечалось во введении, концепция ГЕМ получила развитие в [6, 7] в виде *оптимизационной геометрической евклидовой модели (ОГЕМ)* рынка, образуемого ЛГРЦ на территории Ростовского транспортного узла. Основанием для применения указанного метода является то, что на большей части территории г. Ростова-на-Дону (рис. 1) равномерно и однородно располагается массив потребителей услуг, предоставляемых распределительными центрами. Граница массива, относящегося к основной и наиболее уплотненно застроенной части городской территории, имеет правильную форму, представленную в виде эллипса.

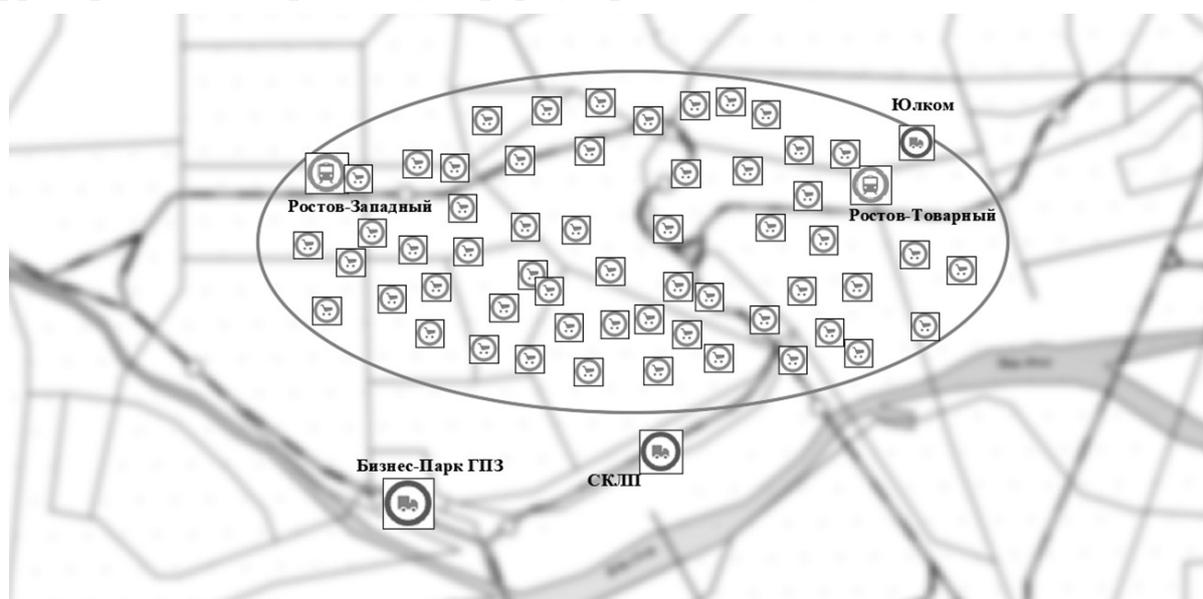


Рис. 1. Схематическое изображение части складской инфраструктуры Ростовского транспортного узла

Дадим краткое описание преобразующего звена транспортно-логистической цепи, которое является предметом исследования в настоящей статье. Грузовые распределительные центры «Бизнес-парк ГПЗ», «СКЛП» и «Юлком» получают продукцию в ассортименте с грузовых станций Ростов-Западный и Ростов-Товарная, а также ряда складов и производственных предприятий. После выполнения транспортно-складских и логистических операций тарно-штучные грузы из центров доставляются автомобильным транспортом к потребителям, которые образуют на указанной выше территории розничную торговую сеть. Результаты обработки методом наименьших квадратов предоставляемых электронной биржей АТІ. SU данных показывают, что для каждого распределительного центра зависимость стоимости перевозки одной транспортной единицы к потребителям от длины пройденного маршрута имеет линейный вид. Для определенности в расчетах принимается, что для всех центров и автомобилей грузоподъемностью 5 т стоимость движенических операций в узле одинакова и равна 1 тыс. руб./км.

Основы метода экономико-географического разграничения «областей влияния» субъектов перевозочного процесса (в их роли могут выступать станции погрузки, ЛГРЦ и т. п.), с помощью которого строится ГЕМ грузоперевозок в данном регионе, подробно изложены в [8, 9].

Обратим теперь внимание на то, что в ГЕМ все транспортные маршруты предполагаются прямолинейными и поэтому их длины представляют собой евклидовы расстояния между началами и концами. Однако реальность такова, что длина маршрута, по которому осуществляется транспортировка груза, во многих случаях существенно превосходит евклидово расстояние от распределительного центра до потребителя (рис. 2).

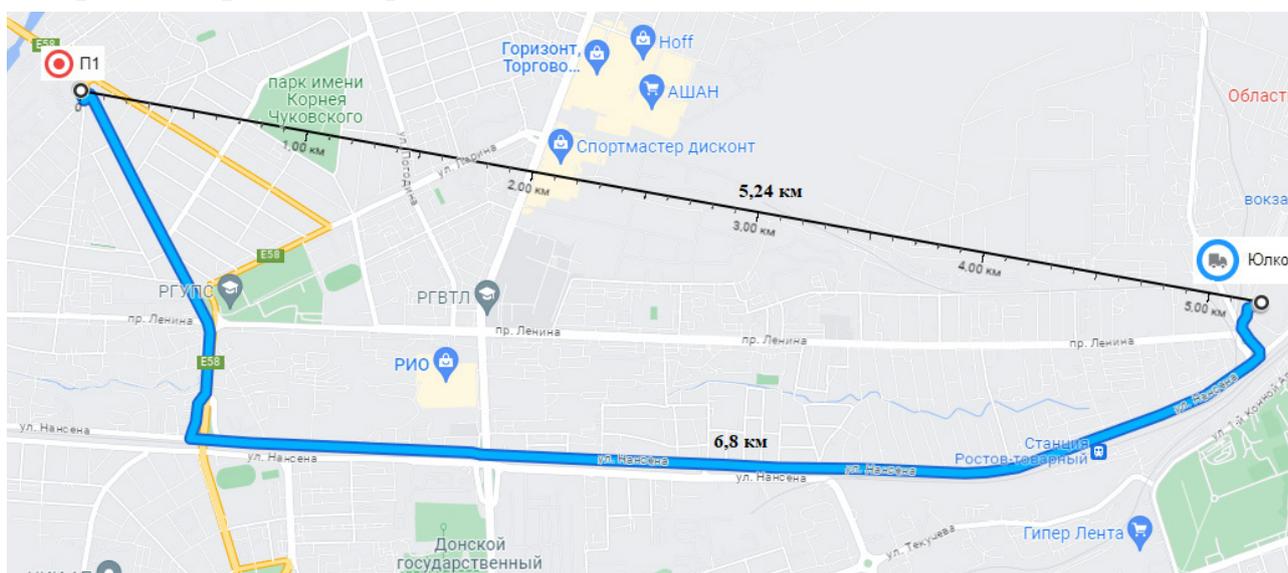


Рис. 2. Схема для сравнения длины маршрута с евклидовым расстоянием

Таким образом, актуальной и целесообразной является разработка математической модели, в которой маршрут транспортировки грузов представлен в том виде, как это происходит фактически на практике.

### Геометрическая маршрутизационная модель как эффективная модификация евклидовой модели

В связи со сделанным замечанием введем в рассмотрение такое понятие, как *коэффициент кружности* субъекта перевозочного процесса. Этот коэффициент является важной характеристикой расположения сети дорог (в данном случае автомобильных) для региона, в котором находятся потребители соответствующих транспортных услуг. Указанная характеристика, рассматриваемая для каждого из участников олигополистического территориального рынка грузоперевозок в регионе, позволяет построить соответствующую *геометрическую маршрутизационную модель (ГММ)*.

Приведем общую схему построения ГММ в случае дуополии. Учитывая направление настоящих исследований, далее в качестве субъектов перевозочного процесса будем рассматривать ЛГРЦ. Пусть  $l_e$  и  $l_m$  — евклидово расстояние и расстояние длины маршрута от рассматриваемого центра до потребителя. Будем

предполагать, что отношение  $\frac{l_m}{l_e}$  представляет собой случайную величину, имеющую

равномерное распределение. Таким образом, если *коэффициент кружности*  $k$  центра определить как математическое ожидание указанной случайной величины, то эта числовая характеристика будет средним арифметическим значений отношения, вычисленных для всех рассматриваемых потребителей.

Как и при построении ГЕМ, введем на плоской географической карте данного региона декартову систему координат. Обозначим  $L$  расстояние между 1-м и 2-м дуополистами (в данном случае распределительными центрами) и будем предполагать, что они находятся соответственно в точках  $O(0, 0)$  и  $A(L, 0)$ . Выбранные координаты не имеют принципиального значения и требуются для того, чтобы далее воспользоваться методом аналитической геометрии. Пусть  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты кружности 1-го и 2-го дуополистов. Их «области влияния» разграничиваются линией, которая определяется стоимостями грузоперевозок от местоположений дуополистов до пунктов назначения (потребителей). В рассматриваемой ситуации предполагается, что приходящиеся на одну транспортную единицу стоимости начально-конечных операций и стоимости движущихся операций на 1 км пути у дуополистов одинаковые. Поэтому уравнение искомой линии имеет следующий вид:

$$k_1 \sqrt{x^2 + y^2} = k_2 \sqrt{(x-L)^2 + y^2}. \quad (1)$$

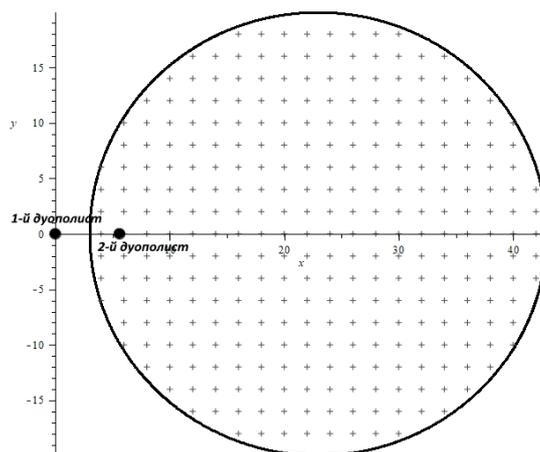


Рис. 3. Разделение плоскости на области влияния дуополюсов

Исключая тривиальные ситуации, предполагаем, что  $k_1 \neq k_2$ . Пусть, например,  $k_1 < k_2$ . Выполнив элементарные преобразования, приходим к каноническому уравнению окружности:

$$\left(x - \frac{Lk_2^2}{k_2^2 - k_1^2}\right)^2 + y^2 = \left(\frac{Lk_1k_2}{k_1^2 - k_2^2}\right)^2 \quad (2)$$

с центром в точке  $C\left(\frac{Lk_2^2}{k_2^2 - k_1^2}, 0\right)$  и радиуса  $R = \frac{Lk_1k_2}{k_2^2 - k_1^2}$ .

На рис. 3 приведена окружность, разделяющая «области влияния» дуополюсов, задаваемая неявными уравнениями (1) и (2) и построенная в случае, когда  $k_1 = 1,53$ ,  $k_2 = 1,76$  и  $L = 5,61$ .

Подводя итог, обратим внимание на то, что первоначальный этап в построении ГММ опирается на статистические данные, которыми необходимо располагать в отношении ЛГРЦ и совокупности рассматриваемых потребителей. На рис. 4 такие данные представлены для центров «Бизнес-Парк ГПЗ», «СКЛП» и «Юлком» и 60 потребителей, находящихся на территории Ростовского транспортного узла (рис. 1).

После вычислений получаем, что коэффициенты окружности центров соответственно равны  $k_1 = 1,53$ ,  $k_2 = 1,76$  и  $k_3 = 1,70$ .

### Геометрическая маршрутизационная модель в оптимизации распределений грузопотоков

Представим реализацию ГММ распределения грузопотоков, возникающих на территории Ростовского транспортного узла в результате функционирования рассматриваемых ЛГРЦ. Как и в предыдущем исследовании, используем вычислительные, аналитические, графические и эвристические возможности, предоставляемые системой компьютерной алгебры Maxima (Free Ware).

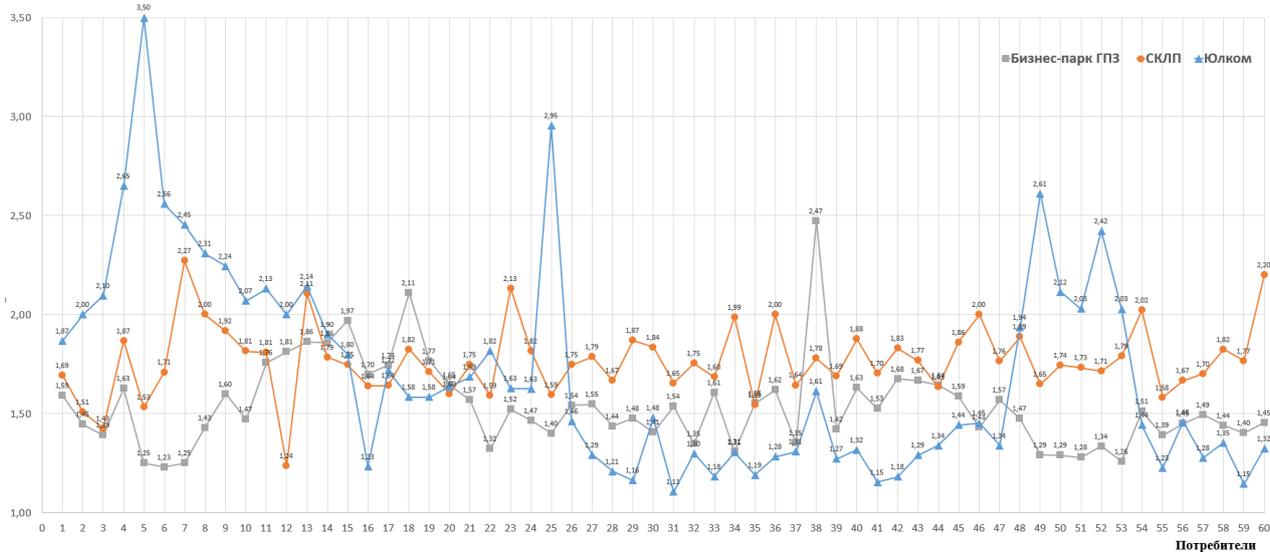


Рис. 4. Диаграммы отношений длин транспортных маршрутов к евклидовым расстояниям

Разработанная ранее ОГЕМ распределения грузопотоков позволяет для грузового распределительного центра, который представляет в данном исследовании особый интерес, находить местоположение, обеспечивающее максимально возможное значение площади его «области влияния». В отношении (выступающего в роли такового центра) «Юлком» отметим, что результат последней итерации (выполненной при реализации соответствующего оптимизационного алгоритма и с учетом ограничений, относящихся, в частности, к уменьшению размера арендной платы) приведен на рис. 5, а.

Перейдем к изложению результатов исследования, которые получены в рамках ГММ. Для проведения вычислительных процедур, позволяющих находить площади «областей влияния» грузовых распределительных центров, обратимся не к классическому интегральному исчислению, а к основной идее метода Монте-Карло. Согласно выполненным в предыдущем разделе аналитическим и геометрическим построениям, в качестве линий, разграничивающих «области влияния» центров, будут выступать дуги окружностей (вместо прямых линий — как в ГЕМ). На рис. 5, б приведено разбиение территории уплотненной городской застройки на «области влияния» трех грузовых распределительных центров, которое осуществляется дугами соответствующих окружностей. Поясним, что в дуополистических ситуациях для пар «Бизнес-парк ГПЗ» — «СКЛП», «Бизнес-парк ГПЗ» — «Юлком» и «СКЛП» — «Юлком» указанными дугами являются а, б и в.

Дадим пояснения к результатам, полученным в рамках ГММ для олигополистической ситуации. «Область влияния» интересующего нас в первую очередь центра «Юлком» представляет собой часть внутренности эллипса, лежащую правее дуг окружностей б и в, и имеет площадь, равную 29,95 км<sup>2</sup>. «Область влияния» центра «СКЛП» является частью внутренности эллипса, расположенной

правее дуги  $a$  и левее дуги  $b$ , и имеет площадь, равную  $19,24 \text{ км}^2$ , а «область влияния» центра «Бизнес-Парк» — частью внутренности эллипса, лежащей левее дуг окружностей  $a$  и  $b$ , и имеет площадь равную  $26,21 \text{ км}^2$ .

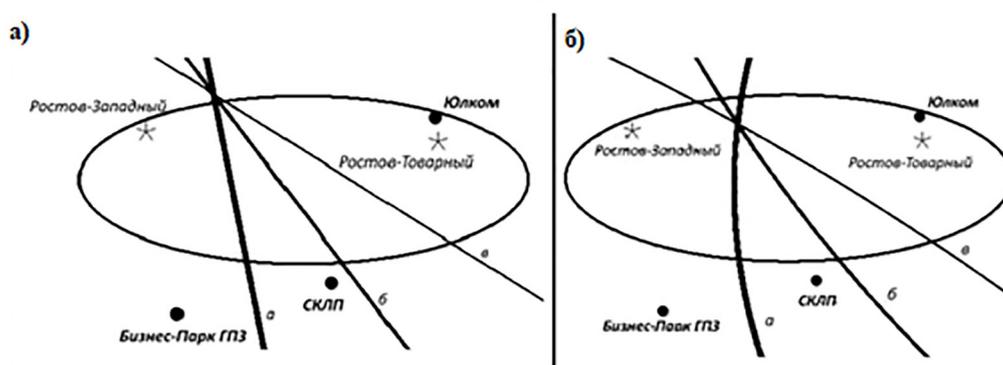


Рис. 5. Разбиение территории узла на «области влияния» центров грузораспределения

Следовательно, геометрия линий разграничения, а также площади «областей влияния», получаемых при использовании *ГММ*, существенно отличаются от тех, что были получены ранее в рамках *ГЕМ*. Таким образом, сравнивая оба подхода между собой (т. е. *ГЕМ* и *ГММ*), нахождением «областей влияния» рассматриваемых ЛГРЦ получаем, что логистический терминал «Бизнес-парк ГПЗ» имеет «область влияния» на 16,9 % больше по варианту рис. 5, б, логистический терминал «СКЛП» имеет «область влияния» на 23,5 % больше по варианту рис. 5, б и логистический терминал «Юлком» имеет «область влияния» больше на 2,5 % по варианту рис. 5, а. Можно сделать вывод, что при оптимизации распределения складских грузопотоков в транспортном узле использование геометрической маршрутизационной модели позволяет определять «области влияния» ЛГРЦ соответственно существующей дорожной сети, что в конечном итоге влияет на зоны обслуживания всех логистических терминалов в транспортном узле.

## Заключение

Развитие авторской *ГЕМ* модели в геометрическую маршрутизационную модель *ГММ* позволяет математически обоснованно и адекватно реальным транспортным ситуациям находить «области влияния» узловых ЛГРЦ, конкурирующих на территориальном олигополистическом рынке грузовых перевозок. Модификация модели дает более точное решение задачи по размещению узловой терминально-складской инфраструктуры и формированию цепей доставки грузов. На примере Ростовского транспортного узла при сравнении моделей *ГЕМ* и *ГММ* получено по вариантам распределения грузов с использованием трех ЛГРЦ и более чем 60 потребителей общее сокращение длин маршрутов на 53, 76 и 70 %

соответственно. Это в конечном итоге влияет на конкуренцию между узловыми ЛГРЦ в части формирования «областей влияния» и конечной общей стоимости доставки груза для потребителя.

Предлагаемая модификация метода и разработанный подход имеют универсальный характер и без принципиальных изменений могут быть использованы для любой части узловой (городской) территории (агломерации, комплекса складских объектов), область массива размещения грузополучателей может иметь как правильную, так и неправильную геометрическую форму. Следует также отметить эффективность в решении задач складской логистики систем аналитических вычислений, позволяющих реализовать алгоритм оптимизации, выполнить необходимые алгебраические преобразования, аналитические вычисления, геометрические построения и классификацию найденных линий, разделяющих «области влияния» объектов складской инфраструктуры.

## Библиографический список

1. Прокофьева О. С. Транспортные терминалы и логистические центры как элементы товаропроводящей сети / Прокофьева О. С. // Вестник ИрГТУ. — 2011. — № 11(58). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transportnye-terminaly-i-logisticheskie-tsentry-kak-elementy-tovarovprovodyashey-seti> (дата обращения: 15.05.2023).
2. Афанасьева Е. А. Оптимизация расположения распределительных центров на обслуживаемой территории / Е. А. Афанасьева // Промышленность: экономика, управление, технологии. — 2017. — № 4(68). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-raspolozheniya-raspredelitelnyh-tsentrov-na-obsluzhivaemoy-territorii> (дата обращения: 19.05.2023).
3. Радаев А. Е. Методика формирования структуры складской распределительной сети промышленных предприятий в условиях мегаполиса / А. Е. Радаев, В. В. Кобзев //  $\pi$ -Economy. — 2015. — № 6(233). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-formirovaniya-struktury-skladskoy-raspreditelnoy-seti-promyshlennyh-predpriyatij-v-usloviyah-megapolisa> (дата обращения: 19.05.2023).
4. Миронюк В. П. Методика определения положения транспортно-логистических центров на территории Ростовской области / В. П. Миронюк // ИВД. — 2012. — № 1. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-opredeleniya-polozheniya-transportno-logisticheskikh-tsentrov-na-territorii-rostovskoy-oblasti> (дата обращения: 19.05.2023).
5. Вдовин В. Н. Задача размещения терминалов по переработке мелких партий груза / В. Н. Вдовин // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. — 2020. — № 2. — С. 103–107. — DOI: 10.51885/15614212\_2020\_2\_103.
6. Числов О. Н. Конфигурирование терминально-складской инфраструктуры транспортного узла на основе развития метода экономико-географического разграничения грузопотоков / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. В. Трапенов и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2022. — № 4. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/konfigurirovanie-terminalno-skladskoy-infrastruktury-transportnogo-uzla-na-osnove-razvitiya-metoda-ekonomiko-geograficheskogo-razgranicheniya-gruzopotokov>

skladskey-infrastruktury-transportnogo-uzla-na-osnove-razvitiya-metoda-ekonomiko-geograficheskogo (дата обращения: 15.05.2023).

7. Chislov O. Method of economic-geographical delimitation of competitive territories which served by the logistics cargo distribution centers of a transport hub / O. Chislov, V. Bogachev, V. Trapenov et al. // E3S Web of Conferences. — 2023. — Iss. 371(5).

8. Числов О. Н. Распределение вагонопотоков операторской компании в припортовых транспортных узлах методом экономико-географического разграничения / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. М. Задорожний и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2016. — № 3(48). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelenie-vagonopotokov-operatorskoj-kompanii-v-priportovyh-transportnyh-uzlah-metodom-ekonomiko-geograficheskogo> (дата обращения: 20.05.2023).

9. Chislov O. N. Modeling Of The Rail Freight Traffic By The Method Of Economic-Geographical Delimitation In The Region Of The South-Easter Coast Of The Baltic Sea / O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. M. Zadorozhniy et al. // Transport Problems, Silesian University of Technology. — 2019. — Vol. 14(2). — Pp. 77–87.

Дата поступления: 12.07.2023

Решение о публикации: 20.08.2023

#### Контактная информация:

ЧИСЛОВ Олег Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой; [o\\_chislov@mail.ru](mailto:o_chislov@mail.ru)

БОГАЧЕВ Виктор Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, доц.; [bogachev-va@yandex.ru](mailto:bogachev-va@yandex.ru)

ТРАПЕНОВ Владимир Викторович — ст. преподаватель; [vladimir.trapenov@mail.ru](mailto:vladimir.trapenov@mail.ru)

ЗАДОРОЖНИЙ Вячеслав Михайлович — канд. техн. наук, доц.; [zadorozhniy91@mail.ru](mailto:zadorozhniy91@mail.ru)

БОГАЧЕВ Тарас Викторович — канд. физ.-мат. наук, доц.; [bogachev73@yandex.ru](mailto:bogachev73@yandex.ru)

## Development of Hub Terminal and Warehouse Infrastructure: Modification of Research Methods and Forecasts

O. N. Chislov<sup>1</sup>, V. A. Bogachev<sup>1</sup>, V. V. Trapenov<sup>1</sup>, T. V. Bogachev<sup>2</sup>, V. M. Zadorozhniy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

<sup>2</sup>Rostov State University of Economics, 69, Bolshaya Sadovaya st., Rostov-on-Don, 344002, Russian Federation

**For citation:** Chislov O. N., Bogachev V. A., Trapenov V. V., Bogachev T. V., Zadorozhniy V. M. Development of Hub Terminal and Warehouse Infrastructure: Modification of Research Methods and Forecasts. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 46–57. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-46-57

#### Summary

**Purpose:** Development of an economic-geographical method in finding the optimal locations of logistics freight distribution centers in the territory under consideration and its application to the construction of a geometric routing model for the distribution of cargo flows. **Methods:** The economic-geographic method of dividing

the 'areas of influence' of transportation process participants. Statistical methods for processing empirical data. Monte Carlo method. **Results:** A geometric routing model has been developed for the distribution of cargo flows generated by participants in the transportation process competing in a territorial oligopolistic freight transportation market. **Practical significance:** The constructed model allows for a proper assessment of the existing transportation network to identify the 'areas of influence' of transportation process participants, considered as oligopolists in the regional freight transportation market.

**Keywords:** Transport hub, distribution of cargo flows, economic-geographical method, geometric routing model, 'areas of influence' of logistics terminals.

## References

1. Prokof'eva O. S. Transportnye terminaly i logisticheskie tsentry kak elementy tovaroprovodyashchey seti [Transport terminals and logistics centers as elements of a distribution network]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of ISTU]. 2011, Iss. 11(58). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/transportnye-terminaly-i-logisticheskie-tsentry-kak-elementy-tovaroprovodyaschey-seti> (accessed: May 15, 2023). (In Russian)

2. Afanas'eva E. A. Optimizatsiya raspolozheniya raspredelitel'nykh tsentrov na obsluzhivaemoy territorii [Optimization of the location of distribution centers in the service area]. *Promyshlennost': ekonomika, upravlenie, tekhnologii* [Industry: economics, management, technology]. 2017, Iss. 4(68). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-raspolozheniya-raspredelitelnykh-tsentrov-na-obsluzhivaemoy-territorii> (accessed: May 19, 2023). (In Russian)

3. Radaev A. E., Kobzev V. V. *Metodika formirovaniya struktury skladsКОЙ raspredelitel'noy seti promyshlennykh predpriyatiy v usloviyakh megapolisa* [Methods of forming the structure of the warehouse distribution network of industrial enterprises in a megalopolis]. *π-Economy*, 2015, Iss. 6(233). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-formirovaniya-struktury-skladsКОЙ-raspredelitelnoy-seti-promyshlennykh-predpriyatiy-v-usloviyakh-megapolisa> (accessed: May 19, 2023). (In Russian)

4. Mironyuk V. P. *Metodika opredeleniya polozheniya transportno-logisticheskikh tsentrov na territorii Rostovskoy oblasti* [Methodology for determining the position of transport and logistics centers on the territory of the Rostov region]. *IVD*, 2012, Iss. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-opredeleniya-polozheniya-transportno-logisticheskikh-tsentrov-na-territorii-rostovskoy-oblasti> (accessed: May 19, 2023). (In Russian)

5. Vdovin V. N. Zadacha razmeshcheniya terminalov po pererabotke melkikh partiy gruzha [The task of placing terminals for the processing of small consignments of cargo / V. N. Vdovin]. *Vestnik Vostochno-Kazakhstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva* [Bulletin of the East Kazakhstan State Technical University. D. Serikbaeva]. 2020, Iss. 2, pp. 103–107. DOI: 10.51885/15614212\_2020\_2\_103. (In Russian)

6. Chislov O. N., Bogachev V. A., Trapenov V. V. Konfigurirovanie terminal'no-skladsКОЙ infrastruktury transportnogo uzla na osnove razvitiya metoda ekonomiko-geograficheskogo

razgranicheniya gruzopotokov [Configuring the terminal and warehouse infrastructure of a transport hub based on the development of the method of economic and geographical delineation of cargo flows]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, Iss. 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/konfigurirovanie-terminalno-skladskoy-infrastruktury-transportnogo-uzla-na-osnove-razvitiya-metoda-ekonomiko-geograficheskogo> (accessed: May 15, 2023). (In Russian)

7. Chislov O., Bogachev V., Trapenov V. et al. Method of economic-geographical delimitation of competitive territories which served by the logistics cargo distribution centers of a transport hub. *E3S Web of Conferences*, 2023, Iss. 371(5).

8. Chislov O. N., Bogachev V. A., Zadorozhniy V. M. et al. Raspredelenie vagonopotokov operatorskoy kompanii v priportovykh transportnykh uzлах metodom ekonomiko-geograficheskogo razgranicheniya [Distribution of car flows of the operator company in port transport hubs by the method of economic and geographical demarcation]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2016, Iss. 3(48). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelenie-vagonopotokov-operatorskoy-kompanii-v-priportovykh-transportnykh-uzlah-metodom-ekonomiko-geograficheskogo> (accessed: May 20, 2023). (In Russian)

9. Chislov O. N., Bogachev V. A., Zadorozhniy V. M. et al. Modeling Of The Rail Freight Traffic By The Method Of Economic-Geographical Delimitation In The Region Of The South-Easter Coast Of The Baltic Sea. *Transport Problems*, Silesian University of Technology, 2019, vol. 14(2), pp. 77–87.

Received: July 12, 2023

Accepted: August 20, 2023

#### **Author's information:**

Oleg N. CHISLOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Department; [o\\_chislov@mail.ru](mailto:o_chislov@mail.ru)

Viktor A. BOGACHEV — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor;  
[bogachev-va@yandex.ru](mailto:bogachev-va@yandex.ru)

Vladimir V. TRAPENOV — Senior Lecturer; [vladimir.trapenov@mail.ru](mailto:vladimir.trapenov@mail.ru);

Viacheslav M. ZADOROZHNIY — PhD in Engineering; [zadorozniy91@mail.ru](mailto:zadorozniy91@mail.ru)

Taras V. BOGACHEV — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor;  
[bogachev73@yandex.ru](mailto:bogachev73@yandex.ru)

УДК 656.2: 658.5

## Развитие логистической транспортной системы России в условиях санкций

О. Д. Покровская

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Покровская О. Д. Развитие логистической транспортной системы России в условиях санкций // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 58–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-58-72

### Аннотация

**Цель:** Провести обзорный критический анализ текущего состояния отечественной логистической транспортной системы в условиях санкций на август 2023 года с использованием статистических данных и визуализации их динамики. **Методы:** Применялись методы статистического анализа, логистики, теории систем, визуализации, системный подход, статистические и аналитические данные открытых источников в сети Интернет. **Результаты исследования:** Показано, что санкционная политика трансформирует подход к управлению процессами перевозок при «разрыве» логистических цепей. Проведен анализ данных об объемах и направлениях железнодорожных перевозок в России, отмечены тренды, перспективы и «узкие места» в работе логистических транспортных систем. **Практическая значимость:** Оценено влияние антироссийских западных санкций на структуру и организацию процесса железнодорожных перевозок. Сформулированы выводы, в числе которых указано, что устойчивое развитие отечественных логистических транспортных систем является гарантом бесперебойного и бесшовного обеспечения товарообменных процессов в стране.

**Ключевые слова:** Логистическая транспортная система, антироссийские западные санкции, подсанкционная экономика, железнодорожные перевозки, транспортно-логистический рынок.

### Введение

Об актуальности исследования текущего состояния и перспектив развития логистических транспортных систем России свидетельствует усиление санкционного давления на нашу страну, что требует, в свою очередь, от логистических транспортных систем адекватной реакции в ответ на вызовы волатильности и нестабильности. Известно, антироссийская санкционная политика оказывает существенное влияние на организацию и развитие логистических транспортных систем в условиях ограничений, что трансформирует подход к управлению процессами перевозок при «разрыве» логистических цепей. В частности, на 12 января 2023 года в отношении России действует порядка 13 596 санкций, введенных западными странами [1], рис. 1.

Транспортные артерии, связывающие Россию с миром на фоне военной операции на Украине и последовавших новых волн санкций, существенно

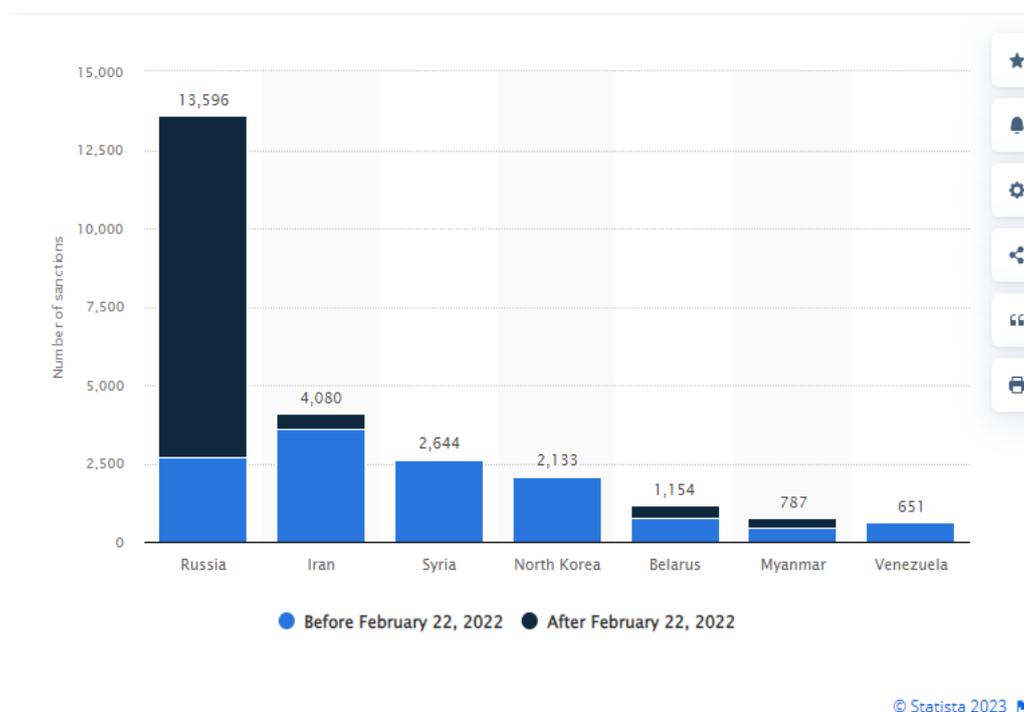


Рис. 1. Количество санкций, введенных против России в 2022 году [1]

трансформировались, что определило высокую актуальность исследования отечественного транспортно-логистического рынка в условиях волатильной экономики. Санкции привели к снижению объемов погрузки по сети ОАО «РЖД» в среднем на 2,5–3 %. В основном это связано с блокировкой грузовых перевозок в направлении на Украину и через Украину.

В данном исследовании предпринята попытка провести обзорный критический анализ текущего состояния отечественной логистической транспортной системы России в условиях санкций на август 2023 года с использованием статистических данных и визуализации их динамики. Надо полагать, что полученные аналитические результаты позволят планировать стратегическое развитие железных дорог с учетом сложившихся трендов и решением отмеченных проблем.

### Характеристика логистической транспортной системы

Можно выделить основные тренды, которые сложились в реалиях развития логистических транспортных систем России к 2023 году (перечень неисчерпывающий):

– Наблюдаемый с весны 2022 года «разрыв» логистических цепей, связанный с запретом экспорта ряда товаров в Европу, ожидаемо привел к снижению импорта не менее чем на 35–43 %.

– Существенное большинство игроков транспортно-логистического рынка России переориентировалось на рынок Азии, прежде всего — на вывоз грузов по Восточному полигону ОАО «РЖД».

– Быстрое перераспределение подвижного состава, используемого при транзитных перевозках, по новым сегментам рынка — прежде всего внутрироссийским.

– Срочное решение проблем «узких мест», развития пограничных железнодорожных переходов и портовых логистических мощностей при двукратном увеличении контейнеропотоков через Восточный полигон, следовавших ранее через Северо-Западные порты, на дальневосточные порты и сухопутные пограничные переходы.

– Переориентация части грузопотоков с автотранспорта при действующих запретах в части дальнейшего пропуска на пограничных пунктах, а также с учетом скачкообразного роста стоимости топлива и эксплуатационных расходов в целом.

– Активизация применения в перевозочном процессе инновационных вагонов с увеличенной нагрузкой на ось [2].

Рассматривать влияние санкций на транспортно-логистическую систему России можно в трех аспектах:

1. Финансового характера — при повышении курса иностранных валют в среднем порядка на 40 %.

2. Информационного характера — при ограниченном использовании иностранного программного обеспечения и функционала многих информационных систем.

3. Логистического характера — при дисбалансе распределения грузопотоков на Северо-Западную инфраструктуру (неиспользование портов на Северо-Западе России) и на Восточную инфраструктуру (рост нагрузки на Восточный полигон железных дорог России).

Учитывая указанные аспекты, можно отметить и направления перспектив, которые открывают санкции для развития российских транспортно-логистических систем («кризис — время возможностей»):

1. По первому аспекту: оптимизация эксплуатационных расходов, потерь при организации логистических систем, активное развитие предиктивной аналитики, прогнозирования и моделирования процессов перевозок в волатильных условиях, оптимизация взаимодействия с участниками логистических цепей при подключении новых платежных сервисов для взаиморасчетов.

2. По второму аспекту: активное развитие отечественного программного обеспечения, максимально адаптированного под условия российского транспортно-логистического рынка, создание интегрированных платформенных сервисов для отечественных участников перевозочного процесса.

3. По третьему аспекту: проработка новых маршрутов, активное развитие логистических транзитных хабов и терминально-складской инфраструктуры

для обслуживания транзитных грузопотоков, построение альтернативных схем доставки с рядом азиатских стран по новым направлениям транспортных коридоров.

Риски и сложности, которые возникают для ОАО «РЖД», эксперты видят в следующем [3]:

- Ослабление позиции ОАО «РЖД» на международном транспортно-логистическом рынке и снижение позиций ОАО «РЖД» в международных инвестиционных рейтингах.

- Сложность нивелирования препятствий при исполнении финансовых обязательств ОАО «РЖД» в иностранной валюте.

- Невозможность проведения объективной оценки экономического эффекта от принятых ограничительных мер на работу транспортных коридоров, изменения в направлениях и объемах грузовых и пассажирских перевозок.

- Сложность нивелирования ограничений, связанных с «выходом» компании — производителя железнодорожной техники «Сименс» из совместных предприятий с холдингом «РЖД», в частности «Сименс Мобильность», которая производила для России электропоезда «Ласточка», грузовые электровозы, а также выполняла техническое обслуживание поездов «Сапсан» [4].

- Рост профицита парка вагонов и снижение арендных ставок в связи с существенным сокращением грузовой базы.

- Динамика погрузки будет сильно зависеть от возможностей грузоотправителей переориентироваться на новые рынки, что будет связано с готовностью транспортной инфраструктуры и конъюнктуры рынков.

- Снижение цен на энергоносители повлияет на размеры российского экспорта: эксперты прогнозируют падение объемов погрузки к 2023 году порядка на 3,0–4,8 % по отношению к 2022 году [5].

- Дальнейшее снижение эксплуатационных показателей на сети ОАО «РЖД»: падение участковой скорости до 37 км/ч (на конец 2021 г.), до 39,7 км/ч (на конец 2022 г.), что ниже участковой скорости в 2020 году на 5 %. Снижение участковой скорости негативно влияет как на оборот вагона, так и на размер потребного вагонного парка.

- При дальнейшем нарушении существующих технологических схем до 200 тысяч вагонов по сети ОАО «РЖД» могут оказаться «вне технологического процесса» [6].

Снижение потребительской и инвестиционной привлекательности железнодорожных перевозок: при «развороте» перевозок с запада на восток, возможности инфраструктуры не могут удовлетворить заявки отправителей грузов. Впервые в направлении Восточного полигона с начала 2022 года порядка 390 крупнейших отечественных предприятий-производителей отправили железнодорожным транспортом товары и грузы на экспорт.

## Как нивелировать негативное влияние санкций?

Поддержку должны получить частные инициативы по строительству железнодорожных путей и портовых мощностей. При этом государство должно помогать не выделением средств, а предоставлением участков.

Развитие транспортно-логистических объектов «критической инфраструктуры», для согласования строительства которой можно радикально снижать нормативные требования, предоставлять налоговые льготы на 15–20 лет [7].

Оптимизация развития коридора «Север — Юг», обеспечивающего сообщение с Ираном, в части применения скидок на транзит с понятным графиком: первые три года — 20 %, с четвертого по шестой — 15 %, с седьмого по десятый — 10 % и далее уже по нормальным тарифам, что повысит привлекательность направления и «переключит» на него морские грузы, которые сегодня сталкиваются с ростом тарифов и рисками судоходства в Черном море.

Заслуживает внимания механизм применения относительно новых для нашей страны вариантов логистического взаимодействия по модели *ship or pay*. По такой модели грузоотправитель обязуется предоставить и оплачивает перевозку гарантированного объема грузов, при этом перевозчик гарантирует предоставление соответствующих провозных мощностей. Иными словами, такая логистическая схема является вариантом синхронизации тарифов при продаже «ниток» графика и наглядно демонстрирует переход от «перевозки грузов» к «перевозке вагонов». Подобный вариант логистического взаимодействия позволит сократить наблюдаемую дискриминацию в цене между видами грузов, что, в свою очередь, обеспечит синхронизацию загрузки железнодорожной логистической инфраструктуры. В современной экономике, как известно, компания «РЖД» становится «ценовым демпфером». Это позволяет снизить нагрузку инфляции путем процессов оптимизации внутри самой отрасли [8].

Рассмотрим работу по снижению санкционного давления на Восточном полигоне.

По прогнозам Института проблем естественных монополий, нагрузка на инфраструктурные мощности Восточного полигона в 2023 году будет по-прежнему возрастать при дефиците провозных и пропускных способностей.

Спрос на отправку грузов в восточном направлении появился в минувшем 2022 году, когда на Восточный полигон было отправлено порядка 153 млн тонн (это почти на 5,4 % выше уровня 2022 года). На динамику грузопотока оказало влияние введения в график движения поездов 3 новых ниток дополнительно для контейнерных поездов для нивелирования проблем массового скопления грузов в контейнерах в портах Дальнего Востока, поскольку в конце 2022 года возник существенный дисбаланс между прибытием экспортных и отправлением импортных контейнеров.

В этих же целях активизировались отправки контейнеров в полувагонах, с выгрузкой в дальневосточных портах, с введением скидки в 20,7 %.

На Восточном направлении за 2022 год проведено 16 тыс. поездов массой 7,1 тыс. тонн. Кроме того, был дан старт пропуску и сдвоенных составов поездов массой 14,2 тыс. тонн. Это позволило реализовать в 2022 году провозную способность Восточного полигона в 158 млн тонн.

Эксперты полагают, что значимым драйвером по «разгрузке» Восточного полигона будет интеграция альтернативных логистических цепей в направлении Северо-Западных портов, о чем свидетельствует почти 3-кратное увеличение отправок каменного угля в Китай через портовую инфраструктуру Северо-Запада в 2022 году [9].

Так, по данным ИАА «ПортНьюс», во втором полугодии 2023 года перевалка грузов в российских портах выросла на 10,5 % к тому же периоду 2022 года, т. е. до 232,0 млн тонн. Наблюдаемый рост перевалки связан не только с переориентацией торговых связей, но и с ростом экспорта сырьевых грузов, рис. 2, 3 [10].



Рис. 2. Динамика перевалки грузов в российских портах во втором полугодии 2023 г. [10]



## Морские порты России. 2 квартал 2023 года



Прирост перевалки по бассейнам (2 квартал 2023 ко 2 кварталу 2022)

Бассейн	нефть	нефтепродукты	сжиженный газ	уголь, кокс	грузы в контейнерах	прочие	всего
Арктический	-2,5%	44,8%	-0,3%	17,2%	-13,6%	-6,0%	1,3%
Балтийский	4,6%	-32,8%	57,3%	20,7%	41,2%	31,9%	3,7%
Азово-Черноморский	5,0%	30,5%	49,9%	-17,6%	37,3%	66,5%	22,1%
Каспийский	2,6%	-	-	-87,0%	59,0%	82,2%	46,9%
Дальневосточный	18,2%	5,1%	-4,0%	4,9%	32,2%	-8,8%	8,2%

Составлено по данным PortNews

Рис. 3. Прирост перевалки грузов в российских портах во втором полугодии 2023 г. [10]

По данным Росморречфлота, грузооборот морских портов России в первом полугодии 2023 года составил 453,3 млн тонн, показав рост на 10,5 %.

Из отчета «РЖД Бизнес Актив» следует следующее.

Объемы перевозок грузов по направлению «Запад» в 2023 г. составили 60 %, «Восток» — 35 % и, соответственно, «Юг» — 5 %. В то же время к марту того же года баланс «Запад/Восток» изменился до соотношения 46 % к 50 %, при этом по направлению «Юг» объем сохранил свой размер до 4 %.

Для сравнения: объем погрузки по итогам первого полугодия 2023 года показал рост на 0,7 % и составил 722,2 млн тонн по ОАО «РЖД», рис. 4.

Грузооборот по сети ОАО «РЖД» в июле 2023 г. составил 219,8 млрд тарифных тонно-километров, рис. 5. [11].

В настоящее время — на июль 2023 года — по всем логистическим направлениям грузы доставляются потребителям, поскольку полностью не «закрыт» ни один маршрут: товарообмен продолжается и с недружественными государствами. При этом надо полагать, грузооборот в направлении «Европа/ЕС» к окончанию 2023 года может значительно упасть.



\* Источник: РЖД, БКС

БКС ЭКСПРЕСС

Рис. 4. Динамика погрузки по сети ОАО «РЖД» [11]



\* Источник: РЖД, БКС

БКС ЭКСПРЕСС

Рис. 5. Динамика грузооборота по сети ОАО «РЖД» [11]

Вместе с тем идет активное развитие и новых маршрутов доставки по территории не только европейских стран, но и с применением логистической инфраструктуры Турции и Азербайджана с «переключением» тех грузов, которые прежде ввозились в Россию из прибалтийских стран, а также транзитом из Белоруссии и Польши. Надо полагать, что товаропотоки в скором будущем будут поступать в Россию напрямую из Китая, а также из Казахстана.

Пути «расшивки» может стать ускоренное продвижение вагонов, обеспечивающих повышение объемов и скоростей перевозки грузов по существующей инфраструктуре, включая сочлененные, специализированные и в перспективе — 8-осные вагоны. Увеличение скорости доставки грузов и повышение эффективности эксплуатации вагона может быть достигнуто также и путем совершенствования конструктивных решений при производстве грузовых вагонов.

Альтернативным путем разгрузки отечественной железнодорожной сети можно считать обязательную уборку с путей общего пользования каждого восьмого отставленного порожнего вагона. Данный вариант осложняется отсутствием в настоящее время нормативного регулирования работы операторских компаний и их взаимодействия с инфраструктурой, адекватного сложившейся ситуации [12].

Новый пакет санкций существенно усилил и дисбаланс перевозок на маршруте Китай — Европа — Китай. Сегодня уже реализуется альтернативная логистическая цепь доставки контейнеров, которые приходят из Китая в Европу, предполагающая досылку порожних контейнеров на Белоруссию и в западную часть России с последующей загрузкой экспортом на Китай, что позволяет нивелировать проблемы «дисбаланса» в распределении подвижного состава.

По «переключению» на альтернативные маршруты есть вариант, что этот объем уйдет на ТМТМ (Транскаспийский международный транспортный маршрут) через Каспий и Кавказ. Однако данный маршрут и так перегружен [13].

В 2022–2023 гг. практически все экономические отрасли столкнулись с антироссийскими западными санкциями. В таких условиях ключевой бизнес-задачей стало снабжение в полной мере локальных производителей сырьем, что особенно важно в условиях «идеального шторма» на рынке, когда рынок существенно трансформировался и перестроился на импортозамещение. Кроме того, потребовалась срочная и гарантированная суверенность от цифровых платформенных решений зарубежного производства [14]. Особенно — в условиях «смещения» географии поставок.

Следует отметить, что бизнес-структуры в России только по прошествии двух лет санкционной западной политики осознали в полной мере стратегическое значение устойчивого развития отечественных логистических транспортных систем как гаранта бесперебойного и бесшовного обеспечения товарообменных процессов в стране [15–17].

Как показал проведенный в данном исследовании анализ, основным выходом из сложившейся ситуации является то, что большинство компаний сконцентрировались на активном применении импортозамещения и других антикризисных мер. Это стало проявляться прежде всего в количестве «прямых взаимодействий» в цепях поставок непосредственно с поставщиком, а также в трансформации концепций экономической эффективности бизнеса. Наблюдается также и существенное «ускорение» процесса цифровизации бизнеса «со скоростью клика» при преимущественном использовании именно российского аппаратно-программного обеспечения.

## Заключение

По итогам проведенного исследования логистических транспортных систем, работающих в подсанкционной российской экономике, можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время, как позволяет судить анализ, в бизнес-решениях, принимаемых ОАО «РЖД» и другими крупнейшими участниками рынка, преобладают инструменты, направленные на повышение эффективности ключевых логистических операций. Прежде всего это связано, на наш взгляд, с доминирующим требованием обеспечения устойчивости логистических цепей, выстраиваемых холдингом «РЖД» в волатильных условиях современной экономики. Надо полагать, что их реализация приведет к снижению рисков и расширению возможностей инвестирования в инновационные технологии и развитие отечественного железнодорожного транспорта. Такой вывод позволяет сделать аналитика, полученная в 2020 году Bain and Company о том, что «компании, отдавшие приоритет инвестициям в обеспечение устойчивости цепочки поставок, могут сократить полный цикл разработки продуктов на 60 % и повысить выходную мощность на 25 %». Следует полагать, что данное соотношение при соответствующей реакции рынка на внешние изменения будет достигнуто и в российских условиях к концу 2023 года.

2. Установлено, что цифровая трансформация и современные технологии для цепочки поставок 4.0 в ближайшем будущем будут формировать устойчивость и конкурентные преимущества, необходимые для быстрого реагирования логистических транспортных систем на сбои и возможности, что позволит реализовать бизнес-функции «со скоростью клика», с широким применением цифровых кроссплатформенных решений.

3. Следует констатировать, что в 2023 году на отечественном транспортно-логистическом рынке отсутствуют структуры, способные реализовать все экспортные потребности экономики в полной мере. Уже сейчас рынок демонстрирует сложившийся монополизм, а также дефицит в сегменте рефрижераторных контейнеров, который был вызван переориентацией грузопотоков в начале 2022 года и привел в

конце 2022 года к резкому возрастанию ставок на перевозку. Эксперты называют выходом из сложившейся ситуации возможную отмену Китаем запрета на экспорт продукции и использование скоростных контейнерных поездов, что существенно сократило бы нагрузку на инфраструктуру портов и сбалансировало бы грузопотоки, осваиваемые как морскими, так и железнодорожными компаниями.

4. Существенные изменения в расписании выходов судов, связанные со снижением количества судозаходов в порты России, привели к увеличению времени ожидания погрузки контейнеров с экспортной продукцией. Как следствие — обострение проблемы подхода к портовой терминальной инфраструктуре, «брошенные поезда» и «заторы» в припортовых транспортных узлах.

5. Ставки фрахта на морских линиях, работающих сегодня в подсанкционной российской экономике, выросли от 15 до 55 % с учетом дальности доставки грузов в экспортных направлениях. На ряде морских и мультимодальных направлений с морским плечом доставка стала практически невозможной из-за разрыва логистических цепей при уходе зарубежных компаний с отечественного рынка.

6. Ключевой проблемой на рынке морских и мультимодальных перевозок с морским плечом доставки является отсутствие свободных контейнеров. Ситуация осложняется уходом крупнейших игроков с рынка российских морских перевозок, что определило удорожание логистических операций в среднем на 40–50 %, а также привело к дефициту предоставления «околотранспортных» услуг по обслуживанию контейнеров в портах.

7. Как следствие негативного влияния, указанного в пп. 4–6, существенно увеличилось время прохождения экспортными грузами государственной границы до 5–6 суток. В 2023 году по сравнению с 2022 годом почти в 2 раза увеличилась совокупная стоимость транспортно-логистического обслуживания.

8. Нагрузка на транспортно-логистическую инфраструктуру ОАО «РЖД» в течение всего 2023 года растет, особенно — на пути к портам Дальнего Востока, а также сухопутных пограничных переходов. Объем заявленных к перевозке грузов сильно существенно превышает наличную пропускную способность. Это приводит к «заторам» на сети, к росту логистических «околотранспортных» затрат, дефициту контейнеров, а также дефициту перегрузочных и терминальных мощностей в портах. Дефицит пропускной способности железных дорог показывает минимум 30 %, что составляет порядка 50 млн тонн в год. Ситуация осложняется тем, что до 2022 года через северо-западные порты грузы в Россию приходили как с западных, так и с восточных направлений. В настоящее же время подавляющая часть грузов «переключилась» на Восточный полигон, на который также был перенаправлен и уголь с Кузбасса.

9. В процессе импортозамещения наблюдается относительный рост объема перевозок во внутрироссийском направлении. Продолжается динамичное наращивание функционала логистических центров, роль которых при трансформации

логистических цепей возрастает на фоне увеличения средней продолжительности хранения товаров на терминале. Это связано с нивелированием рисков дефицита продукции на рынке при колебаниях поставок по новым маршрутам доставки. В целом, по мнению экспертов РБК, это будет драйвером на рынке к использованию инновационных логистических и IT-решений на фоне общего снижения потребительской активности в России.

10. Следует полагать, что объем железнодорожных перевозок критически не снизится за счет оживления доли внутрироссийских перевозок. На маршрутах доставки грузов внутри страны наблюдается «удлинение» логистического плеча при доставке грузов по новым маршрутам.

11. В целом на транспортно-логистическом рынке наблюдается своего рода инерционный эффект, во многом связанный с ростом ключевой ставки и изменением позиций ОАО «РЖД» в международных рейтингах. Финансовая устойчивость компании имеет динамику к снижению за счет возрастания рисков финансового долга, вызванного санкционной западной политикой.

Таким образом, сформулированные в результате анализа текущего состояния отечественной логистической транспортной системы России в условиях санкций на август 2023 года выводы могут быть полезны при стратегическом планировании работы железнодорожного транспорта и выбора резильентного пути для устойчивого, бесшовного и сбалансированного обеспечения нужд современной волатильной экономики.

## Библиографический список

1. TRENDING STATISTICS. — URL: <https://www.statista.com/statistics/1294726/number-of-global-sanctions-by-target-country/> (дата обращения: 06.08.2023).
2. Влияние санкций и как мы с ними боремся? — URL: <https://zhd.online/articles/vliyanie-sanktsiy-na-zhd-rossii-i-kak-my-s-nimi-boremsya/> (дата обращения: 06.08.2023).
3. События после отчетной даты: риски и последствия введения санкций в 2022 году. — URL: <https://ar2021.rzd.ru/ru/corporate-governance/consequences-imposition-sanctions> (дата обращения: 06.08.2023).
4. Война санкций: РБК. — URL: <https://www.rbc.ru/business/19/07/2022/62d6a4649a79478198f5e7f4> (дата обращения: 06.08.2023).
5. Итоги 2022 года. Как отрасль справлялась с санкционными ограничениями. — URL: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1623819/> (дата обращения: 06.08.2023).
6. Санкции разгружают РЖД. — URL: <https://vgudok.com/lenta/sankcii-razgruzhayut-rzhd-v-kompanii-prognoziruyut-snizhenie-zheleznodorozhnogo-gruzopotoka-iz> (дата обращения: 06.08.2023).
7. Треть перевозок сдует санкциями. — URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5292873> (дата обращения: 06.08.2023).

8. Вагоны на восток: чем железная дорога отвечает на санкции: РБК. — URL: <https://www.rbc.ru/opinions/business/01/06/2022/62977ebe9a7947485528b403> (дата обращения: 06.08.2023).
9. Нагрузка на Восточный полигон. — URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/opinions/v-2023-godu-nagruzka-na-vostochnyy-poligon-budet-tolko-velichivatsya-propusknykh-i-provoznnykh-sposob/> (дата обращения: 06.08.2023).
10. Морские порты России во втором квартале 2023 года. — URL: <https://portnews.ru/news/350663/> (дата обращения: 06.08.2023).
11. Статистика РЖД за июль. — URL: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/statistka-rzhd-za-iiul> (дата обращения: 06.08.2023).
12. Непредсказуемая логистика эпохи перемен. Обзор. — URL: <https://www.interfax.ru/business/835549> (дата обращения: 06.08.2023).
13. Куренков П. В. Ситуационно-логистическая система управления перевозочным процессом / П. В. Куренков, В. А. Мартыничук, М. А. Нехаев // Логистика и управление цепями поставок. — 2008. — № 5(28). — С. 25–34.
14. Дроздова М. А. Цифровизация управления эксплуатационной работой на транспорте: новые вызовы и подходы / М. А. Дроздова, Е. А. Фурсова // Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-2022): сб. тр. Международной научно-практической конференции / Под ред. А. Ю. Панычева, Т. С. Титовой, О. Д. Покровской. — СПб.: ПГУПС, 2022. — С. 309–314.
15. Рыбин П. К. Анализ потенциала контейнерных перевозок (на примере Калининградского транспортного узла) / П. К. Рыбин, И. Д. Новикова, Ю. А. Мороз // Техник транспорта: образование и практика. — 2021. — Т. 2. — № 1. — С. 78–86.
16. Рыбин П. К. Модель поддержки принятия решений при оперативном регулировании подвода поездов к припортовым станциям / П. К. Рыбин, Р. В. Горин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2019. — № 4. — С. 69–79.
17. Багутдинов Р. А. Разработка единой централизованной системы управления транспортными потоками / Р. А. Багутдинов, Д. В. Бежуашвили // Техник транспорта: образование и практика. — 2021. — Т. 2. — № 1. — С. 71–77.

Дата поступления: 06.08.2023

Решение о публикации: 29.08.2023

**Контактная информация:**

ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриева — д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой «Управление эксплуатационной работой»; [insight1986@inbox.ru](mailto:insight1986@inbox.ru)

# Development of Russia's Logistics Transport System Under Sanctions

O. D. Pokrovskaya

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Pokrovskaya O. D. Development of Russia's Logistics Transport System Under Sanctions. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 58–72. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-58-72

## Summary

**Purpose:** To conduct a review critical analysis of the current state of the domestic logistics transport system of Russia under sanctions as of August 2023 using statistical data and visualization of their dynamics. **Methods:** Methods of statistical analysis, logistics, systems theory, visualization, system approach, statistical and analytical data from open sources on the Internet have been used. **Results:** It is shown that the sanctions policy transforms the approach to the management of transportation processes when logistics chains are broken. The analysis of data on volumes and directions of railway transportation in Russia is carried out, trends, prospects and bottlenecks in the work of logistics transport systems are noted. **Practical significance:** The impact of anti-Russian Western sanctions on the structure and organization of the railway transportation process is assessed. Conclusions are formulated, among which it is indicated that the sustainable development of domestic logistics transport systems is a guarantee of uninterrupted and seamless provision of commodity exchange processes in the country.

**Keywords:** Logistics transport system, anti-Russian Western sanctions, economy under sanctions, rail transportation, transport and logistics market.

## References

1. TRENDING STATISTICS. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1294726/number-of-global-sanctions-by-target-country/> (accessed: August 6, 2023).
2. *Vliyanie sanktsiy i kak my s nimi boremsya?* [The impact of sanctions and how do we fight them?]. Available at: <https://zhd.online/articles/vliyanie-sanktsiy-na-zhd-rossii-i-kak-my-s-nimi-boremsya/> (accessed: August 6, 2023). (In Russian)
3. *Sobytiya posle otchetnoy daty: riski i posledstviya vvedeniya sanktsiy v 2022 godu* [Events after the reporting date: risks and consequences of sanctions in 2022]. Available at: <https://ar2021.rzd.ru/ru/corporate-governance/consequences-imposition-sanctions> (accessed: August 6, 2023). (In Russian)
4. *Voyna sanktsiy: RBK* [The war of sanctions: RBC]. Available at: <https://www.rbc.ru/business/19/07/2022/62d6a4649a79478198f5e7f4> (accessed: August 6, 2023). (In Russian)
5. *Itogi 2022 goda. Kak otrasl' spravlyalas' s sanktsionnymi ogranicheniyami* [Results of 2022. How the industry coped with sanctions restrictions]. Available at: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1623819/> (accessed: August 6, 2023). (In Russian)
6. *Sanktsii razgruzhayut RZHD* [Sanctions unload Russian Railways]. Available at: <https://vgudok.com/lenta/sankcii-razgruzhayut-rzhd-v-kompanii-prognoziryuyut-snizhenie-zheleznodorozhnogo-gruzopotoka-iz> (accessed: August 6, 2023). (In Russian)
7. *Tret' perevozok sduet sanktsiyami* [A third of shipments will be blown away by sanctions]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/5292873> (accessed: August 6, 2023). (In Russian)

8. *Vagony na vostok: chem zheleznaya doroga otvechaet na sanktsii: RBK* [Cars to the east: how the railway responds to sanctions: RBC]. Available at: <https://www.rbc.ru/opinions/business/01/06/2022/62977e9a7947485528b403> (accessed: August 6, 2023). (In Russian)

9. *Nagruzka na Vostochnyy poligon* [Load on the Eastern polygon]. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/opinions/v-2023-godu-nagruzka-na-vostochnyy-poligon-budet-tolko-velichivatsya-propusknykh-i-provoznnykh-sposob/> (accessed: August 6, 2023). (In Russian)

10. *Morskie porty Rossii vo vtorom kvartale 2023 goda* [Seaports of Russia in the second quarter of 2023]. Available at: <https://portnews.ru/news/350663/> (accessed: August 6, 2023). (In Russian)

11. *Statistika RZhD za iyul'* [Russian Railways statistics for July]. Available at: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/statistika-rzhd-za-iiul> (accessed: August 6, 2023). (In Russian)

12. *Nepredskazuemaya logistika epokhi peremen. Obzor* [Unpredictable logistics of the era of change. Review]. Available at: <https://www.interfax.ru/business/835549> (accessed: August 6, 2023). (In Russian)

13. Kurenkov P. V., Martynchuk V. A., Nekhaev M. A. Situatsionno-logisticheskaya sistema upravleniya perevozochnym protsessom [Situational and logistics management system of the transportation process]. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* [Logistics and supply chain management]. 2008, Iss. 5(28), pp. 25–34. (In Russian)

14. Drozdova M. A., Fursova E. A. *Tsifrovizatsiya upravleniya ekspluatatsionnoy rabotoy na transporte: novye vyzovy i podkhody. Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy na transporte (UERT-2022): sb. tr. Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii; pod red. A. Yu. Panycheva, T. S. Titovoy, O. D. Pokrovskoy* [Digitalization of operational work management in transport: new challenges and approaches. Management of operational work in transport (UERT-2022). Sat. tr. International Scientific and Practical Conference; edited by A. Y. Panychev, T. S. Titova, O. D. Pokrovskaya]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2022, pp. 309–314. (In Russian)

15. Rybin P. K., Novikova I. D., Moroz Yu. A. Analiz potentsiala kontreylernykh perevozok (na primere Kaliningradskogo transportnogo uzla) [Analysis of the potential of contrailer transportation (on the example of the Kaliningrad transport hub)]. *Tekhnika transporta: obrazovanie i praktika* [Transport technician: education and practice]. 2021, vol. 2, Iss. 1, pp. 78–86. (In Russian)

16. Rybin P. K., Gorin R. V. Model' podderzhki prinyatiya resheniy pri operativnom regulirovanii podvoda poezdov k priportovym stantsiyam [Decision support model for operational regulation of train supply to port stations]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2019, Iss. 4, pp. 69–79. (In Russian)

17. Bagutdinov R. A., Bezhuashvili D. V. Razrabotka edinoi tsentralizovannoy sistemy upravleniya transportnymi potokami [Development of a unified centralized traffic management system]. *Tekhnika transporta: obrazovanie i praktika* [Transport technician: education and practice]. 2021, vol. 2, Iss. 1, pp. 71–77. (In Russian)

Received: August 06, 2023

Accepted: August 29, 2023

#### Author's information:

Oksana D. POKROVSKAYA — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Head of the Department “Operational Work Management”; [insight1986@inbox.ru](mailto:insight1986@inbox.ru)

УДК 656.222.6

## Разработка методики перераспределения вагонопотоков (на примере Северо-Западного полигона)

С. А. Пленкин, А. В. Новичихин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Пленкин С. А., Новичихин А. В. Разработка методики перераспределения вагонопотоков (на примере Северо-Западного полигона) // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 73–84. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-73-84

### Аннотация

**Цель:** Повышение экономической эффективности процесса нахождения и перемещения груженых и порожних вагонов на основе совершенствования динамической модели загрузки инфраструктуры ОАО «РЖД» при реализации процесса согласования заявок на перевозку грузов и запросов-уведомлений на перевозку порожних вагонов. **Методы:** Использованы системный подход и теория алгоритмов для выяснения причин скопления вагонов на железных дорогах назначения, проведен анализ текущего распределения вагонопотоков Северо-Западного полигона для выявления закономерностей, определяющих повышение экономических издержек. **Результаты:** Разработана методика поэтапного продвижения вагонопотоков, позволяющая синхронизировать возможности и потребности участников рынка транспортных услуг, для получения положительного экономического эффекта; определены условия равномерности загрузки элементов инфраструктуры, обеспечивающей устранение перегрузки критически значимых участков. **Практическая значимость:** Методика позволяет сбалансировать пропускную способность инфраструктуры и перерабатывающую способность грузополучателя, что повышает экономическую эффективность перевозочного процесса. Грузополучателям будет доступен инструмент, позволяющий влиять на продвижение грузов в свой адрес, а перевозчик снизит эксплуатационные затраты, исключив занятие инфраструктуры на подходах к станциям назначения.

**Ключевые слова:** Динамическая модель, загрузка инфраструктуры, перераспределение вагонопотоков, железнодорожный транспорт, управление процессами перевозок.

### Введение

С 1 марта 2023 года в ОАО «РЖД» для контроля возникающих затруднений в процессе пропуска и переработки вагонопотоков начали вводить логический контроль по ограничению приема заявок на перевозку грузов и запросов-уведомлений на порожние вагоны (заявка) с использованием динамической модели загрузки инфраструктуры (ДМЗИ). В соответствии со статьей 11 Устава железнодорожного транспорта Российской Федерации [1] одной из причин, по которой перевозчик имеет право отказать в согласовании заявки, является обоснованное отсутствие технической и технологической возможности осуществления перевозок. Действующий в настоящее время процесс рассмотрения и согласования заявок установлен распоряжением от 25 ноября 2022 г. № 3090/р «Об утверждении технологии

работы динамической модели загрузки инфраструктуры ОАО «РЖД» [2] при реализации процесса согласования заявок на перевозку грузов и запросов-уведомлений на перевозку порожних грузовых вагонов».

Первоначально производится расчет прогнозируемых доступных для заполнения пропускных способностей инфраструктуры, как железнодорожных путей общего, так и необщего пользования. На следующем этапе осуществляется проверка возможности пропуска объемов, заявленных на сутки вагонопотоков. При этом учитываются уже ранее включенные заявки, оформленные, но не отправленные вагоны со станций погрузки/выгрузки, а также и те, которые уже находятся в движении (в том числе вагоны в подходе к стыковым пунктам со стороны других железнодорожных администраций). Для этого будут использоваться данные о прогнозе пропуска из Автоматизированной системы управления местной работой (АСУ МР). В соответствии с руководством пользователя АСУ МР [3] п. 11.11.1.4 прогноз определяется путем добавления всех плановых операций (простой вагонов, как в составе поездов, так и в ожидании включения в состав поезда), следующих за фактической операцией с вагоном. Если заявка проходит проверку, то в систему АС ЭТРАН передается ответ о возможности согласования с исходным графиком, иначе грузоотправителю предлагается измененная заявка или возможность отказаться от перевозки [4].

Недостатком описанной выше системы перевозки грузов является обеспечение спотовых заявок грузоотправителей [5]. При этом необходимо учитывать устойчивую тенденцию — исполнение заявленных грузоотправителями планов отгрузки ОАО «РЖД» в абсолютном значении значительно ниже фактического исполнения.

Таким образом, актуальной научно-практической задачей является разработка комплексного подхода к управлению перевозочным процессом с учетом технических мощностей пунктов зарождения и погашения грузопотоков в условиях неопределенностей [6]. В качестве объектов управления грузопотоками выделено техническое оснащение участников железнодорожного транспорта, а также процесс перевозки грузов, как элементы сложной транспортной системы [7, 8]. Это предполагает необходимость определения набора входных и выходных данных для своевременного обмена информацией, определяющей взаимное влияние между элементами транспортной системы [9].

### **Подход к управлению перевозочным процессом: концепция и алгоритмическое обеспечение**

По данным [10], в 2015 году среднее расстояние перевозки груза по железной дороге выросло с 2010 года на 15,7 % (составило 1735 км), при практически неизменном объеме во внутреннем сообщении погрузка на экспорт увеличилась

на 10 %. При этом в структуре экспорта доминируют отправки на большие расстояния — свыше 3000 км, в 2015 году доля составила 42,5 %. В первом полугодии 2020 года [11] средняя дальность составила 1891 км. В 2021 году доля экспорта в структуре погрузки по видам сообщения составила 38,2 % (в том числе 27,4 % через порты) [12, 13].

Стоимость морской транспортировки из основных экспортных до ключевых портов стран-потребителей различается несущественно, поэтому наибольшую важность имеет цена груза в порту отгрузки. В свою очередь, для экспортера демередж (денежное возмещение убытка, плата, причитающаяся за простой судна в течение контрсталийного времени) судна значительно превышает стоимость занятия железнодорожной инфраструктуры путей общего пользования, поэтому главным приоритетом для грузоотправителя является своевременное накопление судовой партии и исключение простоя судна. Это может приводить к переполнению складских площадей (емкостей) в порту и, как следствие, к невозможности приема ранее принятого к перевозке груза, избыточному скоплению на подходах к станции назначения.

Ввиду того, что ОАО «РЖД» является естественной монополией, размер платы определяется Федеральной службой по тарифам [14]. Поэтому ОАО «РЖД» не может предусмотреть на договорной основе плату за занятие инфраструктуры общего пользования.

Для обеспечения потребностей грузополучателей и своевременного исключения занятия инфраструктуры общего пользования невостребованным грузом необходимо доверительное (прозрачное) и долгосрочное (с временным интервалом 3–7 дней) планирование между грузополучателем и перевозчиком.

Концептуальная структура комплексного подхода к управлению перевозочным процессом с учетом технических мощностей пунктов зарождения и погашения грузопотоков в условиях неопределенностей представлена на рис. 1.

Одним из результатов решения научно-практической задачи станет формирование последовательного плана продвижения вагонопотоков с учетом потребностей получателя груза (вагонов), а также его текущего выполнения перерабатывающей способности предприятия. Предпосылки для решения — низкая эффективность текущей системы регулирования вагонопотоков. Ввод и окончание ограничений на отгрузку в направлении грузополучателя (ГП) с задержкой ввиду многоуровневого процесса согласования, что приводит к избыточному наполнению инфраструктуры невостребованными вагонами либо к непроизводительному простоям технических средств всех участников транспортного рынка.

В настоящей работе предлагается разделение маршрута следования на регулировочные зоны ( $A_{(n-i)}$  — железнодорожные участки, ограниченные станциями смены бригад (локомотивов) либо переформирования составов, где  $n$  — номер регулировочной зоны,  $i$  — переменная счетчик). Продвижение поезда в

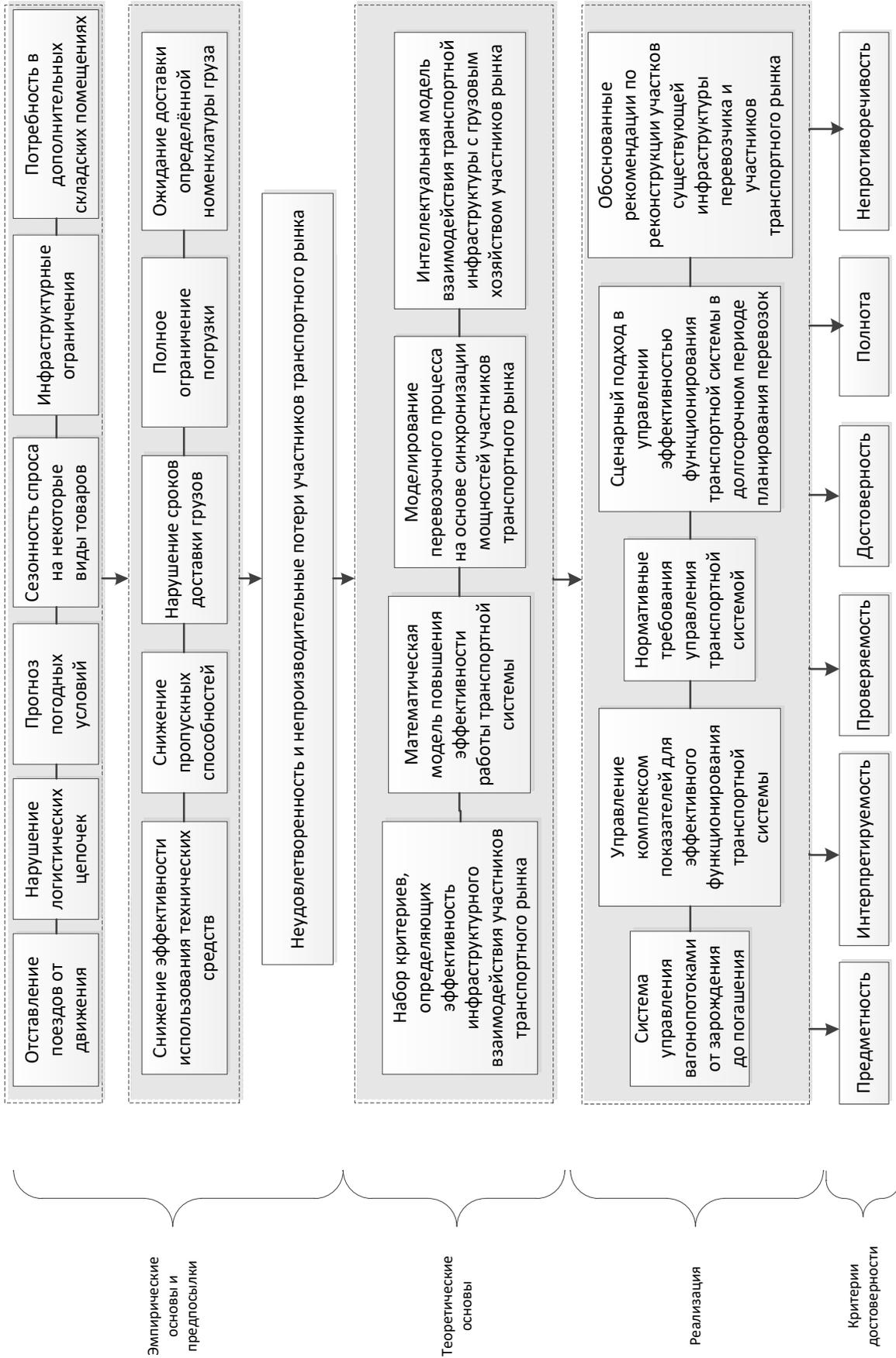


Рис. 1. Концептуальная структура комплексного подхода к управлению перевозочным процессом с учетом технических мощностей пунктов зарождения и погашения грузопотоков в условиях неопределенностей

следующую регулировочную зону происходит при выполнении одного из следующих условий (которые имеют свои ограничения):

1) наличие поездов/вагонов (П/В) в следующей регулировочной зоне не превышает расчетный норматив, который учитывает технические возможности по задержке продвижения поездов;

2) ГП выставлена отметка о приоритетном подводе П/В (чем больше расстояние между регулировочной зоной нахождения поезда от станции назначения, тем меньшее количество П/В может быть определено грузоотправителем как приоритетное, и наоборот).

Заключительная зона  $A_n$  включает станцию назначения, а также прилегающий участок с возможностью доставки П/В в течение не более 10–12 часов (одной локомотивной бригадой).

На данном этапе начальником станции и ГП (морским перевозчиком) на основании договора об организации работы по обеспечению перевалки грузов в морском порту ежедневно составляется сменно-суточный план совместной работы (ССПР). Именно подписание сторонами данного документа устанавливает согласованную норму погрузки/выгрузки вагонов с разбивкой по основным родам груза.

Регулировочная зона  $A_{(n-1)}$ , предшествующая  $A_n$ , определяется возможностью доставки поездов/вагонов не более 20–24 часов (требуется использование минимум двух бригад). Каждая последующая регулировочная зона  $A_{(n-i)}$  будет определяться плечами работ локомотивных бригад. В качестве примера на рис. 2 представлено расположение регулировочных зон по маршруту следования со станции отправления Куйбышевской железной дороги на станцию назначения Октябрьской железной дороги.

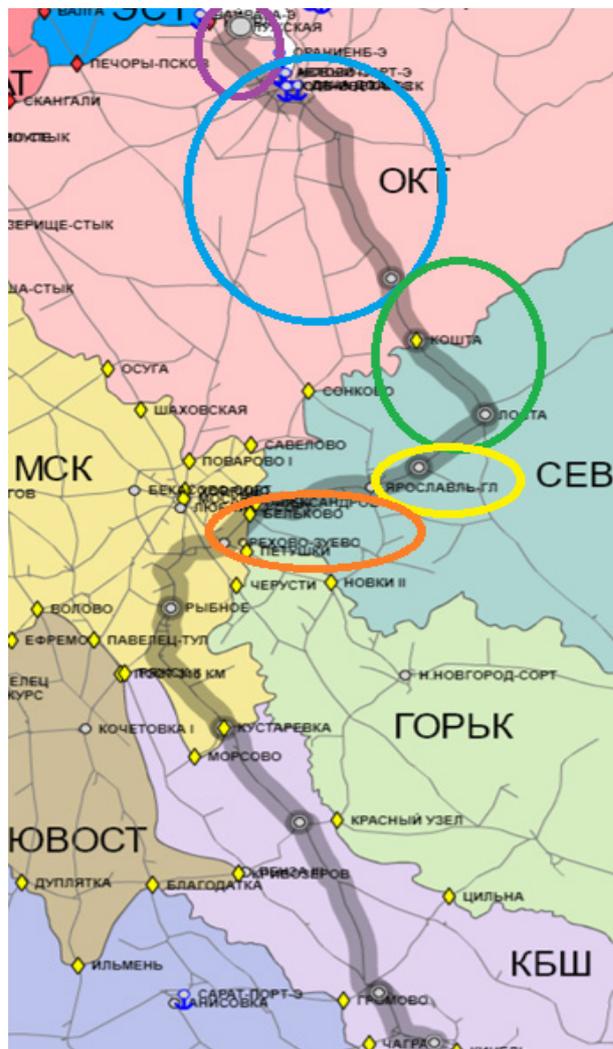


Рис. 2. Пример расположения регулировочных зон по маршруту следования со станции отправления Куйбышевской железной дороги на станцию назначения Октябрьской железной дороги

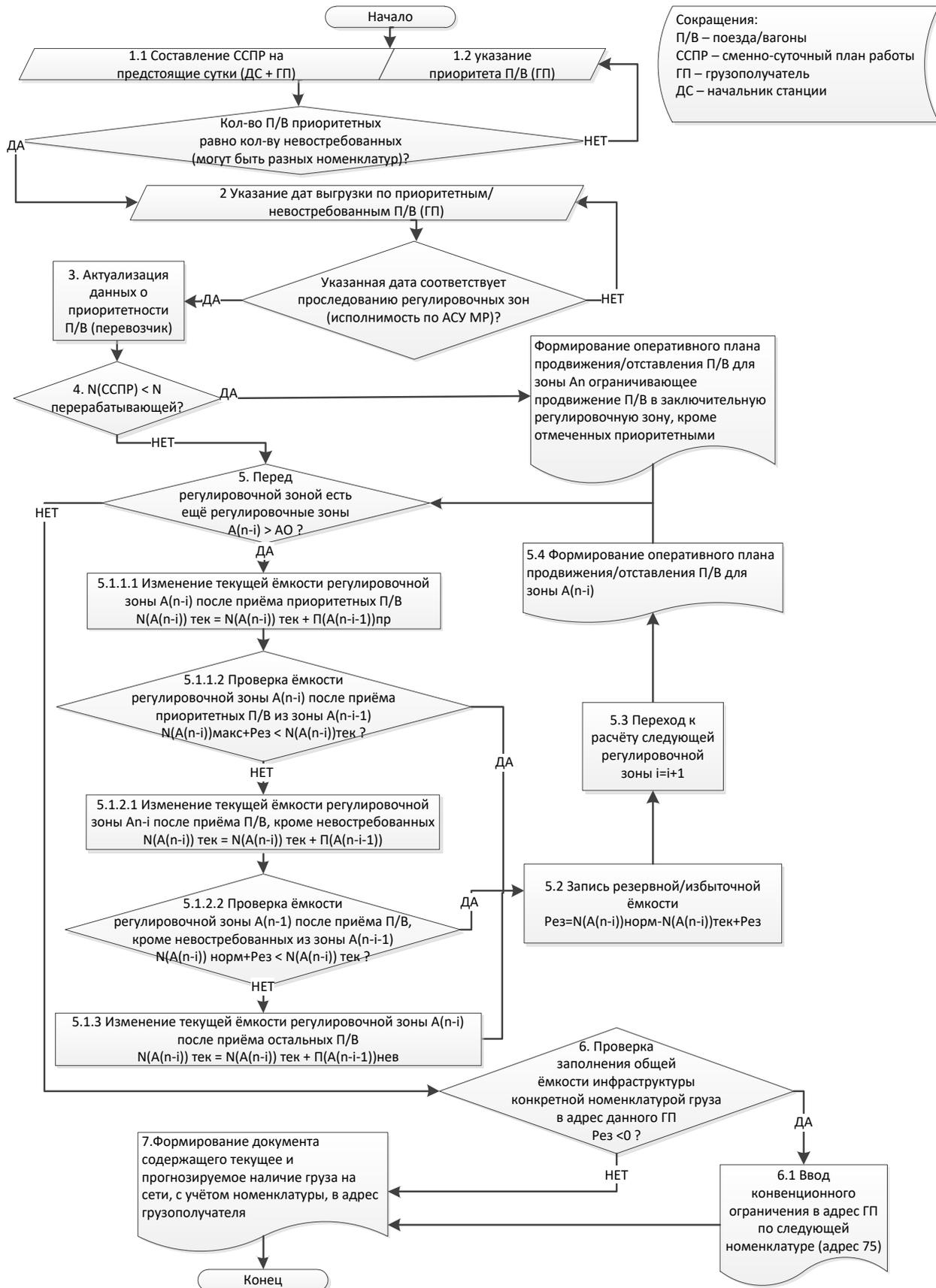


Рис. 3. Алгоритм распределения вагонопотоков

На первом этапе составляется и подписывается ССПР. До перехода ко второму этапу ГП предлагается перечень П/В, следующих в его адрес, с указанием сроков доставки в соответствии с транспортной накладной. ГП может определить среди данного перечня приоритет востребованности П/В. При выборе ГП приоритетного П/В должно быть аналогичное количество менее востребованных, на которые у перевозчика возникает право отставления от движения по причине, которая не является зависящей от ОАО «РЖД», на экономически обоснованный срок, но не более трех суток (возможно заблаговременное продление по инициативе ГП). Далее отставленные П/В не могут быть определены ГП как приоритетные в продвижении, но при этом они учитываются при расчете баланса востребованности поездов. П/В, отставленные от движения указанным выше порядком, также учитываются при расчете занятия регулировочной зоны аналогично находящимся в пути.

На втором этапе ГП необходимо указать плановые даты приема приоритетных и невостребованных П/В, после чего производится автоматическая проверка исполнимости указанных сроков при помощи прогноза пропуска АСУ МР.

После оценки исполнимости происходит обновление данных на стороне перевозчика. Затем на четвертом этапе происходит текущая оценка выполнения перерабатывающей способности ГП, на основании которой формируется оперативный план продвижения П/В в заключительную регулировочную зону.

На пятом этапе производится циклический расчет продвижения каждой категории поездов в зависимости от приоритета во всех регулировочных зонах (переменная  $i$  изменяет значения от 1 до  $n$ ). При этом при каждом цикле расчета учитываются резерв или переполненность в уже рассчитанных регулировочных зонах. Итогом каждого цикла является план продвижения П/В в следующую регулировочную зону для ДНЦ/ДСЦ (ДСП) на начало смены (пример представлен в таблице). В плане продвижения П/В содержится информация для каждого поезда или вагона, не находящегося в сформированном составе, о станции нахождения П/В, категории его востребованности грузополучателем, времени продвижения в следующую регулировочную зону.

На заключительном этапе производится проверка общей емкости инфраструктуры. В случае наполнения на всех регулировочных зонах количества П/В, превышающих доступную для данного ГП емкость, вводится ограничение на погрузку в полном объеме до следующего расчета емкости (12 часов).

## Результаты

Регулирование продвижения поездов будет производиться за счет задержки невостребованных поездов на промежуточных станциях соседних со станциями смены локомотивных бригад/локомотивов, а вагонов — на станциях

План продвижения вагонов в регулировочную зону № 11 на 1 мая 2023 г.  
(дневная смена для ДНЦ и ДСЦ/ДСП)

№ п. п.	№ поезда	Индекс	Станция дислокации на начало смены	Востребованность	Кол. ваг.	Прибытие		
						План	Факт	+/-
Сформированные поезда								
1	2002	0401-***-0763	ВОЙСКОВИЦЫ	переформировать	53	18:13		
2	2003	8527-***-0764	МОЛОСКОВИЦ	переформирование в след зоне	65	18:24		
3	2005	8500-***-0764	ГАТ.Б	отставить	85	18:42		
...	...	...	...	...	...	...		
67	1901	0452-***-0764	ЛУЖСКАЯ	маршрут	72	16:03		
68	2004	0401-***-0763	64 КМ	отставление в след зоне	53	16:45		
69	2007	6482-***-0764	УЙТА	к передаче	66	17:05		
69								
Не сформированы в поезда								
1			СПСМ	низкая	10			
2			Луга-1	высокая	15			
...			...		...			

переформирования с последующим выставлением, при необходимости, на ближайшие станции для ожидания дальнейшего продвижения [15].

Для различных станций назначения, находящихся в границах одного региона, могут быть различные регулировочные зоны.

Этот алгоритм выполняет описанную в задаче логику и рекомендует к продвижению поезда только в том случае, если выполнены условия нормы вместимости инфраструктуры следующей регулировочной зоны. Затем он выводит текущую вместимость каждой регулировочной зоны и наличие поездов в каждой из зон.

## Заключение

Использование разработанного метода перераспределения вагонопотоков позволит:

- 1) учитывать потребности ГП с учетом дат планируемой выгрузки;
- 2) синхронизировать пропускную способность инфраструктуры и мощности ГП по переработке вагонопотоков;
- 3) сбалансировать наличие груза на сети железных дорог;
- 4) повысить эффективность взаимодействия участников транспортно-логистического комплекса;
- 5) повысить гибкость системы управления процессами перевозок к факторам изменения спроса и предложения;
- 6) увеличить экономическую эффективность процесса транспортировки груза.

Практическую реализацию необходимо производить поэтапно, начиная с полигона железных дорог, обладающего наибольшими резервами пропускной способности.

Дальнейшими направлениями исследований являются анализ количества и размеров регулировочных зон в зависимости от мощности грузопотока, определение возможных вариантов сроков отставления П/В.

## Библиографический список

1. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации: Федеральный закон от 10 января 2003 г. № 18-ФЗ (ред. от 28 февраля 2023 г.) // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/901838121#7DE0K8>.

2. Об утверждении Технологии работы динамической модели загрузки инфраструктуры ОАО «РЖД» при реализации процесса согласования заявок на перевозку грузов и запросов-уведомлений на перевозку порожних грузовых вагонов: Распоряжение ОАО «РЖД» от 25 ноября 2022 г. № 3090/р // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1300534546>.

3. Автоматизированная система управления местной работой АСУ МР: Руководство пользователя 52569005.27542.030.ИЗ 20.01.2020 // Центр информационных технологий на транспорте. — URL: [https://cittransm.ru/?page\\_id=6724](https://cittransm.ru/?page_id=6724).

4. Баушев А. Н. Алгоритмы оптимизации процесса согласования заявок на перевозки грузов по сети российских железных дорог / А. Н. Баушев, В. С. Сафронов, А. Т. Осьминин и др. // Вестник транспорта Поволжья. — 2022. — № 5. — С. 52–66.

5. Войцеховский А. Железные дороги динамично смоделируют потоки. Рынок опасается внедрения новой системы согласования заявок, которую тестируют в РЖД / А. Войцеховский // Гудок. — 2023. — URL: <https://vgudok.com/lenta/zheleznye-dorogi-dinamichno-smodeliruyut-potoki-rynok-opasaetsya-vnedreniya-novoy-sistemy>.

6. Кудрявцев В. А. Процесс накопления вагонов на составы поездов / В. А. Кудрявцев, А. А. Светашев // Известия Петербургского университета путей сообщения — 2014. — № 3(40). — С. 98–104.

7. Ефименко Ю. И. Актуальные проблемы управления перевозочным процессом: сб. научн. тр. / Ю. И. Ефименко, А. Т. Осьминин; отв. ред. А. Т. Осьминин. — СПб.: ПГУПС, 2002. — 190.

8. Угрюмов А. К. Оперативное управление движением на железнодорожном транспорте / А. К. Угрюмов, Г. М. Грошев, В. А. Кудрявцев и др. — М.: Транспорт, 1983. — 239 с.

9. Регламент взаимодействия подразделений ОАО «РЖД» при определении ответственности за просрочку доставки грузов и порожних собственных вагонов: Распоряжение ОАО «РЖД» от 7 августа 2014 г. № 1853р // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/420226441?marker=65A0IQ>.

10. Симонова Т. С 2010 по 2015 г. среднее расстояние перевозки груза по железной дороге выросло на 15,7 % / Т. Симонова // РЖД-Партнер. — 2016. — URL: <https://www.rzd-partner.ru/>

zhd-transport/news/s-2010-po-2015-gg--srednee-rasstoianie-perevozki-gruza-po-zheleznoi-doroge-  
vyroslo-na-15-7-413674/.

11. Сетевое издание Центр раскрытия информации: ОАО «РЖД» // Годовой отчет. — URL: <https://www.e-disclosure.ru/portal/files.aspx?id=4543&type=2&attempt=3>.

12. Чернышевская Ю. Операторы подвели итоги полугодия: растут погрузка, парк и ставки / Ю. Чернышевская // РЖД-Партнер. — 2021. — URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/operatory-podveli-itogi-polugodiya-rastut-pogruzka-park-i-stavki/>.

13. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/553927831?marker=7DS0KA>.

14. Быков С. А. Естествен ли монополизм ОАО «РЖД»? / С. А. Быков, Е. Б. Кибалов // Всероссийский экономический журнал ЭКО. — 2013. — № 7. — С. — 91–105.

15. Сотников Е. А. Рациональная технология временной отстановки поездов от движения / Е. А. Сотников, П. С. Холодняк // Вестник ВНИИЖТ. — 2019. — № 1. — С. 3–9.

Дата поступления: 07.08.2023

Решение о публикации: 28.08.2023

#### Контактная информация:

ПЛЕНКИН Сергей Александрович — аспирант; [wamg@mail.ru](mailto:wamg@mail.ru)

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук, и. о. зав. кафедрой «Логистика и коммерческая работа»; [novitchihin@bk.ru](mailto:novitchihin@bk.ru)

## Developing a Methodology for the Redistribution of Car Traffic (on the Example of the North-Western Polygon)

S. A. Plenkin, A. V. Novichikhin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Plenkin S. A., Novichikhin A. V. Developing a Methodology for the Redistribution of Car Traffic (on the Example of the North-Western Polygon). *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 73–84. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-73-84

#### Summary

**Purpose:** To increase economic efficiency of the process of finding and moving loaded and empty cars on the basis of improving the dynamic model of loading the infrastructure of JSC “Russian Railways” during the implementation of the process of approving applications for cargo transportation and notification requests for the transportation of empty wagons. **Methods:** Systematic approach and the theory of algorithms have been used to find out the reasons for the accumulation of cars on railways, an analysis has been made of the current distribution of car traffic in the North-Western Polygon to identify systemic patterns that encourage

an increase in economic costs. **Results:** A method of stage-by-stage progress of car traffic has been developed, which allows to synchronize the capabilities and needs of participants of the transport services market in order to obtain a positive economic effect; the conditions for the uniform loading of infrastructure elements are determined, which make it possible to exclude overloading of critically important sections. **Practical significance:** The method allows us to balance the capacity of the infrastructure and the processing capacity of the consignee, which increases the economic efficiency of the transportation process. Consignees will have access to a tool that allows them to influence the progress of goods to their address, and the carrier will reduce operating costs by eliminating the occupation of infrastructure at the approaches to destination stations.

**Keywords:** Dynamic model, loading of infrastructure, redistribution of car traffic, railway transport, management of transportation processes.

## References

1. Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossiyskoy Federatsii: Federal'nyy zakon ot 10 yanvarya 2003 g. № 18-FZ (red. ot 28 fevralya 2023 g.) [Charter of Railway Transport of the Russian Federation: Federal Law of January 10, 2003 № 18-FZ (as amended on February 28, 2023)]. *Elektronnyy fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov* [Electronic Fund of Legal and Regulatory and Technical Documents]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901838121#7DE0K8>. (In Russian)
2. Ob utverzhdenii Tekhnologii raboty dinamicheskoy modeli zagruzki infrastruktury OAO "RZhD" pri realizatsii protsessa soglasovaniya zayavok na perevozku gruzov i zaprosov-vedomleniy na perevozku porozhnykh gruzovykh vagonov: Rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 25 noyabrya 2022 g. № 3090/r [On the approval of the Technology for the operation of the dynamic model for loading the infrastructure of Russian Railways when implementing the process of coordinating applications for the transportation of goods and requests-notifications for the transportation of empty freight cars: Order of Russian Railways dated November 25, 2022 № 3090/r]. *Elektronnyy fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov* [Electronic fund of legal and normative-technical documents]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1300534546>. (In Russian)
3. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya mestnoy rabotoy ASU MR: Rukovodstvo pol'zovatelya 52569005.27542.030.I3 20.01.2020 [Automated local work management system ACS MR: User manual 52569005.27542.030.I3 01.20.2020]. *Tsentr informatsionnykh tekhnologiy na transporte* [Center for Information Technologies in Transport]. Available at: [https://cittransm.ru/?page\\_id=6724](https://cittransm.ru/?page_id=6724). (In Russian)
4. Baushev A. N., Safronov V. S., Osminin A. T. et al. Algoritmy optimizatsii protsessa soglasovaniya zayavok na perevozki gruzov po seti rossijskikh [Algorithms for optimizing the process of approving applications for cargo transportation on the network of Russian railways]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga region]. 2022, Iss. 5, pp. 52–66. (In Russian)
5. Wojciechowski A. Zheleznye dorogi dinamichno smodeliruyut potoki. Rynok opasaetsya vnedreniya novej sistemy soglasovaniya zayavok, kotoruyu testiruyut v RZHD [Railways dynamically simulate flows. The market is afraid of the introduction of a new system of approval of applications, which is being tested in Russian Railways]. *Gudok* [Gudok]. 2023. Available at: <https://vgudok.com/lenta/zheleznye-dorogi-dinamichno-smodeliruyut-potoki-rynok-opasaetsya-vnedreniya-novoy-sistemy>. (In Russian)
6. Kudryavtsev V. A., Svetashev A. A. Process nakopleniya vagonov na sostavy poezdov [The process of accumulation of wagons on trains]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2014, Iss. 3(40), pp. 98–104. (In Russian)
7. Efimenko Yu. I., Osminin A. T.; ed. by A. T. Osminin. *Aktual'nye problemy upravleniya perevochnym processom* [Actual problems of transportation process management: Collection of scientific tr.]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2002, 190 p. (In Russian)

8. Ugryumov A. K., Groshev G. M., Kudryavtsev V. A. et al. *Operativnoe upravlenie dvizheniem na zheleznodorozhnom transporte* [Operational traffic management on railway transport]. Moscow: Transport Publ., 1983, 239 p. (In Russian)

9. Reglament vzaimodeystviya podrazdeleniy OAO “RZhD” pri opredelenii otvetstvennosti za prosrochku dostavki грузов i porozhnikov sobstvennykh vagonov: Rasporyazhenie OAO “RZhD” ot 7 avgusta 2014 g. № 1853r [Regulations for the interaction of divisions of Russian Railways in determining responsibility for the delay in the delivery of goods and empty own cars: Order of Russian Railways dated August 7, 2014 № 1853r]. *Elektronnyy fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov* [Electronic Fund of Legal and Regulatory and Technical Documents]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/420226441?marker=65A0IQ>. (In Russian)

10. Simonova T. S 2010 po 2015 g. srednee rasstoyanie perevozki gruzha po zheleznoy doroge vyroslo na 15,7 % [From 2010 to 2015, the average distance of cargo transportation by rail increased by 15.7 %]. *RZhD-Partner* [RZD-Partner]. 2016. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/s-2010-po-2015-gg--srednee-rasstoianie-perevozki-gruza-po-zheleznoi-doroge-vyroslo-na-15-7-413674/>. (In Russian)

11. Setevoe izdanie Tsentra raskrytiya informatsii: OAO “RZhD” [Online publication Information Disclosure Center: Russian Railways]. *Godovoy otchet* [Annual Report]. Available at: <https://www.e-disclosure.ru/portal/files.aspx?id=4543&type=2&attempt=3>. (In Russian)

12. Chernyshevskaya Yu. Operatory podveli itogi polugodiya: rastut pogruzka, park i stavki [Operators summed up the results of the half year: loading, fleet and rates are growing]. *RZhD-Partner* [RZD-Partner]. 2021. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/operatory-podveli-itogi-polugodiya-rastut-pogruzka-park-i-stavki/>. (In Russian)

13. Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshchestva “Rossiyskie zheleznye dorogi” do 2025 goda: Rasporyazhenie Pravitel’sтва Rossiyskoy Federatsii ot 19 marta 2019 g. № 466-r [Long-term development program of the open joint-stock company “Russian Railways” until 2025: Decree of the Government of the Russian Federation dated March 19, 2019 № 466-r]. *Elektronnyy fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov* [Electronic Fund of Legal and Regulatory and Technical Documents]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/553927831?marker=7DS0KA>. (In Russian)

14. Bykov S. A., Kibalov E. B. *Estestven li monopolizm OAO “RZHD”?* [Is the monopoly of JSC “Russian Railways” natural?]. *Vserossiyskiy ekonomicheskij zhurnal EKO* [All-Russian Economic Journal ECO]. 2013, Iss. 7, pp. 91–105. (In Russian)

15. Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S. Racional’naya tekhnologiya vremennoj otstanovki poezdov ot dvizheniya [Rational technology of temporary separation of trains from traffic]. *Vestnik VNIIZHT* [Bulletin of VNIIZhT]. 2019, Iss. 1, pp. 3–9. (In Russian)

Received: August 07, 2023

Accepted: August 28, 2023

#### Author’s information:

Sergey A. PLENKIN — Postgraduate Student; [wamg@mail.ru](mailto:wamg@mail.ru)

Aleksey V. NOVICHKIN — Dr. Sci. in Engineering, Acting Head of the Department “Logistics and Commercial Work”; [novichkin@bk.ru](mailto:novichkin@bk.ru)

УДК 621.833.15

## Методика определения минимально допустимой толщины обода цельнокатаных колес грузовых вагонов в эксплуатации

А. А. Воробьев, И. В. Федоров, О. А. Конограй, С. А. Метлякова, Н. К. Мигулин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Воробьев А. А., Федоров И. В., Конограй О. А., Метлякова С. А., Мигулин Н. К. Численное определение минимально допустимой толщины обода цельнокатаных колес грузовых вагонов в эксплуатации // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 85–99. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-85-99

### Аннотация

**Цель:** Определение минимально допустимой толщины обода цельнокатаных колес грузовых вагонов в зависимости от конструктивного исполнения и осевой нагрузки. **Методы:** Применяются методы теории упругости, методы численного решения дифференциальных уравнений в частных производных. **Результаты:** Определены минимально допустимые толщины ободьев цельнокатаных колес грузовых вагонов, а также значения коэффициента запаса сопротивления усталости для колес, изготавливаемых по чертежам 13.45.1043-01А, 13.45.1011-143, 13.45.1399-207, при толщине обода от 30 до 16 мм и различной осевой нагрузке. Расчеты показали, что у колес, изготавливаемых по чертежам 13.45.1043-01А, 13.45.1399-207, минимально допустимая толщина обода может быть снижена до 16 мм. **Практическая значимость:** Получена зависимость коэффициента запаса сопротивления усталости от толщины обода и осевой нагрузки с точностью до 15 %, а также определенные минимально допустимые толщины ободьев цельнокатаных колес позволят повысить их срок службы.

**Ключевые слова:** Колесная пара, дефект поверхности катания колеса, износ гребня колеса, толщина обода, конечно-элементная модель.

### Введение

В странах, имеющих железнодорожную колею шириной 1520 мм, наблюдается низкий срок службы колес [1–3], связанный с их частыми обточками по причине повышенного износа гребня. Точные причины значительного износа гребней колес до сих пор не установлены. Выдвигаются различные гипотезы, что может служить причиной интенсивного износа гребней колес: неправильное содержание пути, конструкция подвижного состава, неправильная технология ремонта вагонов [4], свойства колесных сталей [5] и т. д. Восстановление профиля при износе гребня в настоящее время производится только за счет обточки колеса [6], что приводит к снижению толщины обода колеса до значения ниже допустимого, после чего колесо списывается. Попытка восстанавливать гребень колеса путем наплавки не удалась. Так как причины повышенного износа гребней колес до сих пор не установлены и технология восстановления

гребня колеса без снижения толщины обода отсутствует, то необходимо предложить мероприятия, которые позволят увеличить срок службы колеса при существующих условиях эксплуатации и существующей технологии ремонта. Одной из таких мер может стать понижение минимально допустимой толщины обода колеса, однако применять данное мероприятие необходимо с осторожностью, обеспечивая при этом безопасность движения поездов. Следует учитывать, что цельнокатаные колеса вагонов могут иметь различную конструкцию, изготавливаться из различных марок колесных сталей [7] и эксплуатироваться в разных условиях.

Так, далеко не все грузовые вагоны эксплуатируются с осевой нагрузкой, близкой к максимально допустимой. У вагонов для перевозки легковых автомобилей максимальная осевая нагрузка часто не превышает 15 тс. В настоящее время созданы вагоны для контрейлерных перевозок (перевозок автомобильных полуприцепов на железнодорожных платформах), где осевая нагрузка не превышает 15–18 тс, но крайне важно уменьшить расстояние от уровня головки рельса до уровня пола вагона [8].

В распоряжении ОАО «РЖД» находится парк грузовых вагонов, необходимых для проведения ремонта путей (платформы для перевозки рельсовых плетей, платформы рельсосварочных поездов, хоппер-дозаторы и т. д.). Данные вагоны имеют низкую интенсивность эксплуатации и, соответственно, низкий износ колес. Многие технологические вагоны имеют практически неизношенные колеса, что в условиях дефицита колес провоцирует работников железнодорожного транспорта на противоправные действия, связанные с подменой колесных пар у технологических вагонов, принадлежащих ОАО «РЖД».

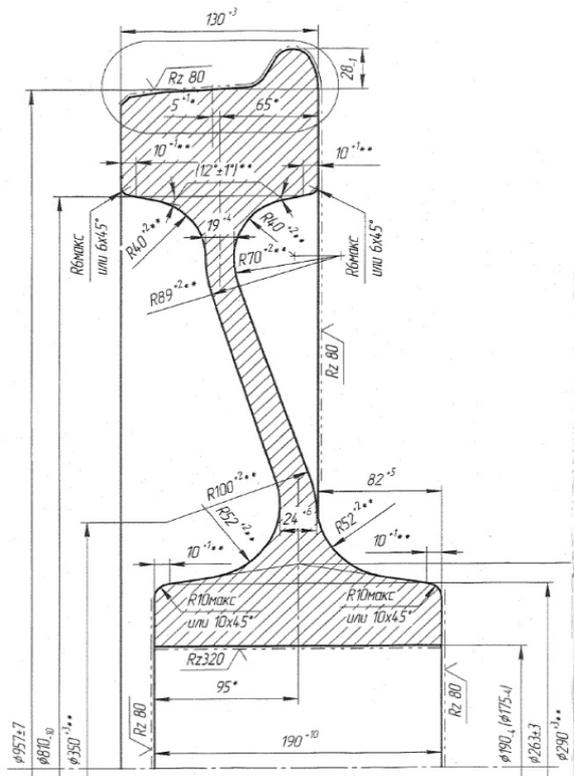
Именно для описанных выше категорий подвижного состава (вагонов с низкой осевой нагрузкой и вагонов, используемых для ремонта путей) целесообразно рассмотреть возможность уменьшения минимально допустимой толщины обода колеса.

### **Конструкция и материалы, используемые для изготовления цельнокатаных колес**

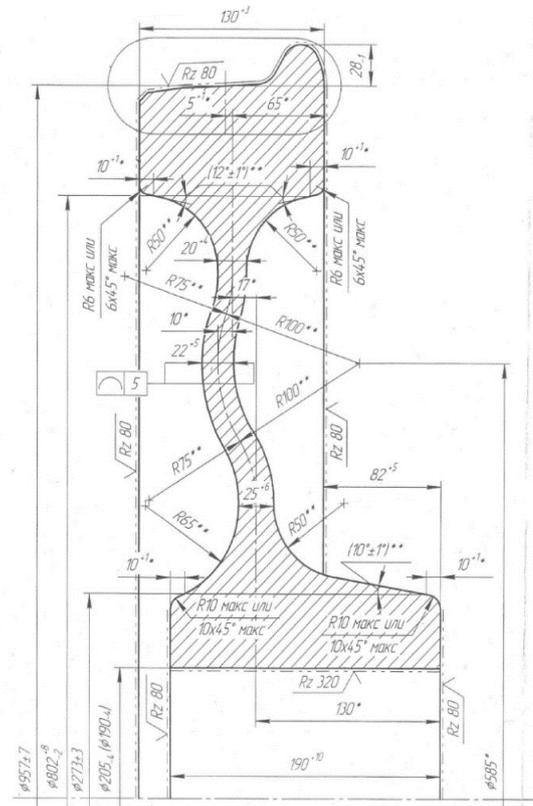
Конструкция и материалы, из которых изготавливаются цельнокатаные колеса вагонов, определяются ГОСТ 10791—2011.

Для определения максимальной толщины рассматривались колеса плоским коническим диском — чертеж 13.45.1043-01А (рис. 1, *а*), колесо с криволинейным диском — чертеж 13.45.1011-143 (рис. 1, *б*) и колесо, изготовленное по чертежу 13.45.1399-207 (рис. 1, *в*).

а



б



в

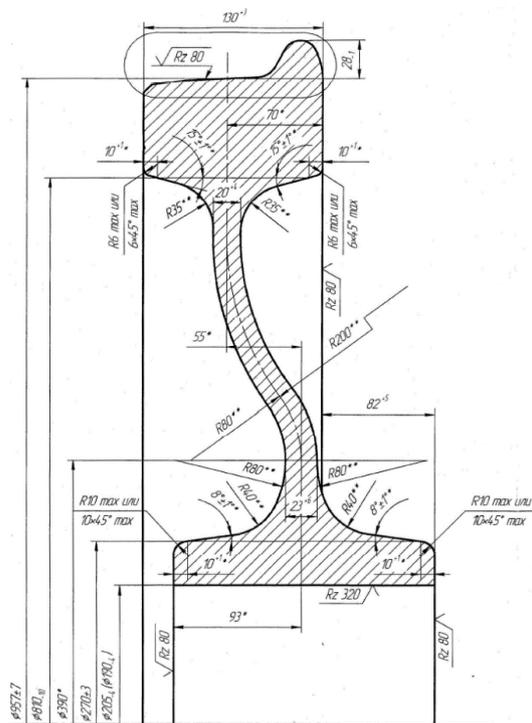


Рис. 1. Колеса железнодорожного подвижного состава, изготовленные по чертежам:  
 а — 13.45.1043-01А;  
 б — 13.45.1011-143;  
 в — 13.45.1399-207

## Определение минимально допустимой толщины обода цельнокатаных колес

Для определения минимально допустимой толщины обода колеса произведем расчеты на прочность согласно ГОСТ 33783—2016 [9] для трех вариантов конструкции колеса, при различной осевой нагрузке методом конечных элементов [10] с использованием пакета прикладных программ Ansys Workbench версии 18.2.

На рис. 2 представлена конечно-элементная модель колеса вместе с частью оси с использованием конечного элемента типа 10-узловой тетраэдр с криволинейными гранями. Колесо моделировалось вместе с частью оси. Размер сетки конечных элементов на криволинейных элементах диска 5 мм.

Нагрузки прикладывались к модели в виде сосредоточенных сил. Напряжения, возникающие в зоне приложения сосредоточенных нагрузок, в расчете не учитываются.

Нагрузки, действующие на колесо, определялись по методике, приведенной в ГОСТ 33783—2016.

Расчет производится для набегающего колеса. Схема приложения нагрузок, действующих на колесо, показана на рис. 3.

В соответствии с ГОСТ 33783—2016 для оценки усталостной прочности колеса используются первые главные напряжения. Определенные в результате расчета первые главные напряжения для колеса — чертеж 13.45.1043-01А при минимальной толщине обода для грузовых вагонов 22 мм показаны на рис. 4.

По конкретным значениям напряжений определяются амплитуды и средние значения первых главных напряжений в расчетной точке.

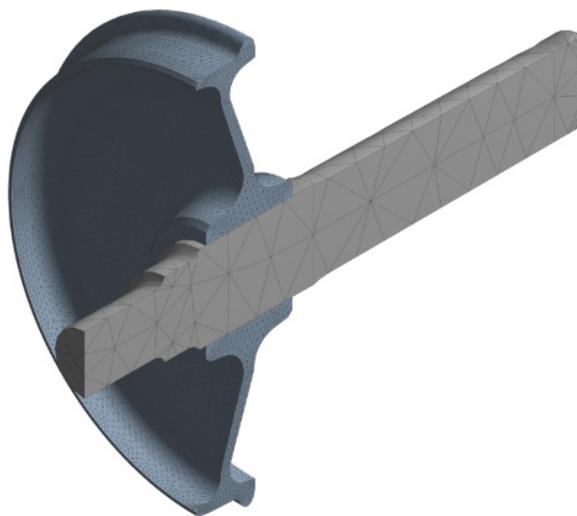


Рис. 2. Конечно-элементная модель колеса с плоским коническим диском

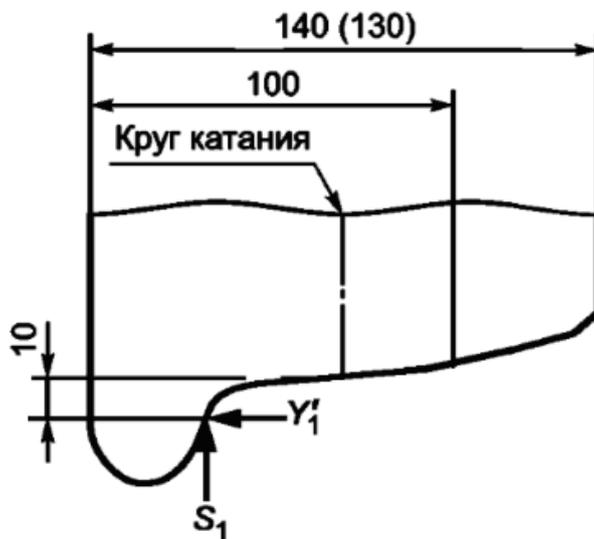


Рис. 3. Схема приложения нагрузок на набегающее колесо:  
 $S_1, Y_1$ , — вертикальная и боковая нагрузки на набегающее колесо от рельса

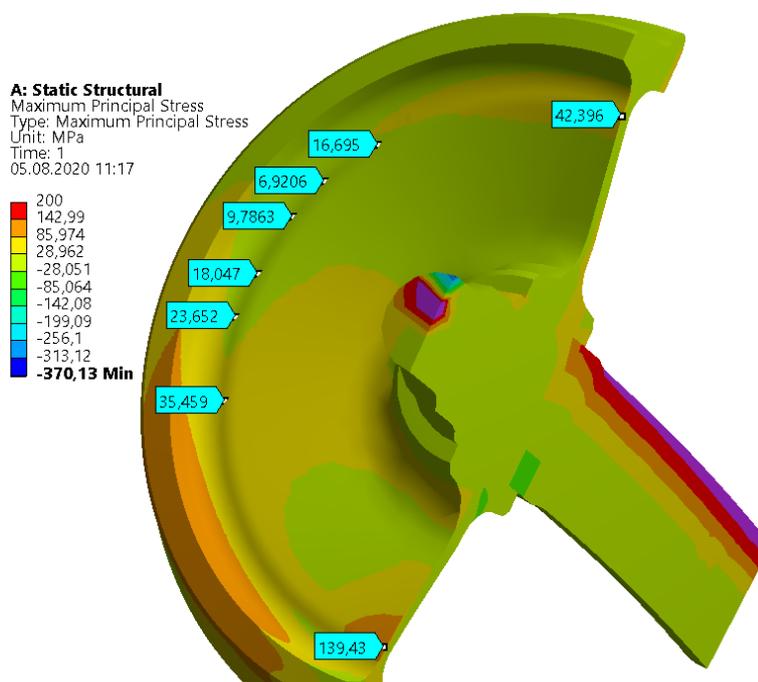


Рис. 4. Распределение первых главных напряжений

Амплитуда расчетных напряжений  $\sigma_{ai}$  определяется как полуразность напряжений при угловом положении расчетного сечения колеса относительно точки контакта с рельсом, равном  $0^\circ(\sigma_{i(0)})$  и  $180^\circ(\sigma_{i(180)})$ :

$$\sigma_{ai} = \frac{\sigma_{i(0)} - \sigma_{i(180)}}{2}. \tag{1}$$

При этом среднее напряжение  $\sigma_{mi}$  вычисляется по формуле:

$$\sigma_{mi} = \frac{\sigma_{i(0)} + \sigma_{i(180)}}{2}. \quad (2)$$

Усталостная прочность колес в соответствии с ГОСТ 33783—2016 оценивается по коэффициенту запаса сопротивления усталости  $n_{y.k}$ , который определяется в соответствии с зависимостью:

$$n_{y.k} = \frac{\sigma_{a.d} k_2}{\sigma_{ai} k_1}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{a.d}$  — предел выносливости в амплитудах цикла МПа, определяется по п. 7.6.3.1 ГОСТ 33783—2016 или по результатам стендовых испытаний натурального колеса при асимметричном цикле нагружения регулярным круговым изгибом;

$k_2$  — коэффициент, учитывающий зависимость сопротивления усталости от значения суммарного среднего напряжения цикла, определенного в расчетном эксплуатационном режиме;

$k_1$  — коэффициент, учитывающий зависимость сопротивления усталости от значения суммарного среднего напряжения цикла, имевших место при стендовых испытаниях натуральных образцов колес.

Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  определяются по формуле:

$$k_{1,2} = 1,0 - 0,42 \cdot \left( \frac{\sigma_{mi,2}}{\sigma_T} \right), \quad (4)$$

где  $\sigma_{mi,2}$  — среднее напряжение цикла (напряжения растяжения принимают со знаком плюс, сжатия — со знаком минус);

$\sigma_T$  — предел текучести материала колеса, МПа.

При расчетах будем определять предел выносливости колеса согласно п. 7.6.3.1 ГОСТ 33783—2016. При этом будет получена заниженная оценка усталостной прочности колеса, так как результаты натуральных испытаний показывают большее значение предела выносливости колеса, чем указано в ГОСТ 33793—2016.

Согласно ГОСТ 33793—2016 для цельных колес, упрочненных дробью по

ГОСТ 10791—2011, предел выносливости  $\frac{\sigma_{a.d}}{k_1}$  принимают в диапазоне от 150 до

160 МПа (при расчете будем принимать равным 150 МПа).

При расчетах будем принимать допустимое значение коэффициента запаса сопротивления усталости не менее 1,7 (не менее 1,7 — при наличии результатов предварительных расчетов на прочность, при отсутствии полигонных и стендовых испытаний колес на усталость).

Максимальная осевая нагрузка принималась для колеса по чертежу 13.45.1043-01А — 23,5 тс, для колес по чертежу 13.45.1011-143 и 13.45.1399-207 — 25 тс.

Толщину обода колес при расчетах будем принимать от 30 до 16 мм. Минимально допустимое в эксплуатации значение толщины обода колеса для грузового вагона согласно [6, 11] составляет 22 мм.

Результаты расчетов коэффициента запаса сопротивления усталости для трех вариантов конструкции колес при различной толщине обода и осевой нагрузки представлены в табл. 1–3.

Из результатов, приведенных в табл. 1–3, видно, что реализовать предложение по снижению допустимой толщины обода можно для колес, изготавливаемых по чертежам 13.45.1043-01А и 13.45.1399-207. Колеса, изготавливаемые по чертежам 13.45.1043-01А и 13.45.1399-207, даже при максимальной осевой нагрузке и толщине обода 16 мм имеют коэффициент запаса сопротивления усталости более 1,7, что позволяет снизить для этих колес минимально допустимую толщину обода до 16 мм.

Снижение минимально допустимой толщины обода с 22 до 16 мм позволит увеличить ресурс колеса еще на один пробег между обточками. Исходя из среднего расчетного числа обточек колес, принимаемого согласно [12] равным пяти, ресурс колеса может быть увеличен до 16,6 %.

Понижение минимально допустимой толщины обода колеса в совокупности с реализацией мероприятий, изложенных в работах [13, 14], позволит существенно снизить дефицит колес, имеющий место в настоящее время.

Колеса с уменьшенной до 16 мм предельной толщиной обода целесообразно использовать в первую очередь под вагонами, которые используются для ремонта путей, что позволит предотвратить противоправные действия, связанные с подменной колесных пар у данных вагонов.

Методом наименьших квадратов установлена зависимость коэффициента запаса сопротивления усталости  $n$  от толщины обода ( $t$ , мм) и осевой нагрузки ( $P$ , тс) с точностью до 15 %. Зависимость представлена в виде:

$$n = A \cdot t^{\alpha} \cdot P^{\beta}.$$

Для различных конструкций колес величины  $A$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  приведены в табл. 4.

Представленная выше зависимость позволяет определить коэффициент запаса сопротивления усталости  $n$  без проведения трудоемких расчетов.

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчета для колеса по чертежу 13.45.1043-01А

Осевая нагрузка $P_0$ , тс	Толщина обода колеса, мм	Амплитуда расчетных напряжений $\sigma_{ai}$ , МПа	Среднее напряжение цикла $\sigma_{mi}$ , МПа	Коэффициент запаса сопротивления усталости колеса $n_{y,k}$
23,5	30	33	65	4,23
	26	42	69	3,31
	22	45,5	80,5	3,02
	20	52	87	2,62
	18	60	97	2,24
	16	68	106	1,96
22	30	32	62	4,38
	26	37	68	3,76
	22	43,5	75,5	3,17
	20	49,5	81,5	2,77
	18	55,5	90,5	2,45
	16	63,5	93,5	2,12
20	30	31,5	55,5	4,48
	26	33,5	61,5	4,19
	22	38	65	3,68
	20	46	75	3
	18	53	84	2,58
	16	60	92	2,25
18	30	30,5	49,5	4,66
	26	32	57	4,4
	22	38,5	62,5	3,64
	20	42,5	68,5	3,27
	18	49	77	2,81
	16	55	84	2,49
15	30	24,5	44,5	5,84
	26	28,5	48,5	4,99
	22	32,5	54,5	4,35
	20	37,5	58,5	3,75
	18	41,5	64,5	3,37
	16	48	73	2,88

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета для колеса по чертежу 13.45.1011-143

Осевая нагрузка $P_0$ , тс	Толщина обода колеса, мм	Амплитуда расчетных напряжений $\sigma_{ai}$ , МПа	Среднее напряжение цикла $\sigma_{mi}$ , МПа	Коэффициент запаса сопротивления усталости колеса $n_{у.к}$
25	30	74,5	132,5	1,73
	26	78	136	1,64
	22	89	149	1,42
	20	92,5	149,5	1,37
	18	101,5	156,5	1,23
	16	105	160	1,18
23,5	30	60	115	2,17
	26	73,5	128,5	1,76
	22	84,5	138,5	1,51
	20	81,5	141,5	1,46
	18	96	148	1,31
	16	99	151	1,27
20	30	61	108	2,18
	26	63,5	110	2,08
	22	72,5	119,5	1,8
	20	73	118	1,8
	18	82,5	127,5	1,57
	16	86	130	1,5
18	30	55,5	98,5	2,42
	26	58	101	2,3
	22	66,5	108,5	2
	20	68,5	110,5	1,93
	18	75,5	116,5	1,74
	16	78,5	118,5	1,67
15	30	48	83	2,85
	26	49,5	85,5	2,76
	22	56,5	92,5	2,39
	20	59	94	2,29
	18	64	99	2,1
	16	66,5	100,5	2,02

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета для колеса по чертежу 13.45.1399-207

Осевая нагрузка $P_0$ , тс	Толщина обода колеса, мм	Амплитуда расчетных напряжений $\sigma_{ai}$ , МПа	Среднее напряжение цикла $\sigma_{mi}$ , МПа	Коэффициент запаса сопротивления усталости колеса $n_{y.k}$
25	30	45	79	3,05
	26	50	84	2,73
	22	57	93	2,37
	20	62	96	2,17
	18	67,5	104,5	1,98
	16	70,5	107,5	1,88
23,5	30	42,5	74,5	3,25
	26	47,5	79,5	2,89
	22	54,5	87,5	2,49
	20	59	91	2,29
	18	64,5	98,5	2,08
	16	67	102	1,99
20	30	37	64	3,78
	26	41,5	68,5	3,35
	22	47,5	75,5	2,9
	20	51,5	78,5	2,67
	18	56	85	2,43
	16	58,5	88,5	2,32
18	30	34,5	58,5	4,08
	26	38,5	62,5	3,64
	22	43,5	69,5	3,19
	20	47	71	2,95
	18	51,5	77,5	2,67
	16	54	80	2,54
15	30	29,5	49,5	4,82
	26	33,5	53,5	4,22
	22	38	59	3,7
	20	40,5	60,5	3,47
	18	44,5	66,5	3,13
	16	46,5	68,5	2,99

ТАБЛИЦА 4. Величины  $A$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ 

№	Конструкция колеса		
	Чертеж 13.45.1043-01А	Чертеж 13.45.1011-143	Чертеж 13.45.1399-207
$A$	0,909178	5,178941	4,581671
$\alpha$	1,143843	0,214203	0,950437
$\beta$	-0,74533	-0,56698	-1,13069

## Заключение

1. В результате проведенных расчетов определены значения коэффициентов запасов сопротивления усталости для колес, изготавливаемых по чертежам 13.45.1043-01А, 13.45.1011-143, 13.45.1399-207, при толщине обода от 30 до 16 мм и различной осевой нагрузке.

2. Результаты расчетов показывают, что у колес, изготавливаемых по чертежам 13.45.1043-01А, 13.45.1399-207, минимально допустимая толщина обода может быть снижена до 16 мм.

3. Колеса с уменьшенной предельной толщиной обода целесообразно использовать в первую очередь под вагонами, которые используются для ремонта путей, и вагонами с низкой осевой нагрузкой.

4. Получена зависимость коэффициента запаса сопротивления усталости  $n$  от толщины обода ( $t$ , мм) и осевой нагрузки ( $P$ , тс) с точностью до 15 %.

**Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».**

## Библиографический список

1. Воробьев А. А. Прогнозирование ресурса и совершенствование технологии ремонта колес железнодорожного подвижного состава: дис. ... д-ра техн. наук / А. А. Воробьев. — СПб.: ПГУПС, 2018. — 289 с.

2. Орлова А. М. Библиографические исследования вопросов интенсивности износа и механизмов образования усталостного выкрашивания рабочей поверхности обода в зависимости от типа подвижного состава, осевой нагрузки, рельефа и профиля пути (прямые, кривые, подъемы и уклоны), скоростей движения и пробега. Постановка задач для расчетных и экспериментальных исследований для профиля ГОСТ 10791 / Отчет по теме 80. Часть 1 / А. М. Орлова, А. А. Воробьев. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. — 165 с.

3. Орлова А. М. Разработка расчетной методики оценки ресурса колес. Оценка ресурса колес ОАО «ВМЗ» с учетом результатов испытаний образцов в зависимости от свойств материала, конструкционной скорости, осевой нагрузки, варианта репрезентативного маршрута и

параметров промежуточных технологических обточек с целью восстановления профиля колеса. Сравнение результатов расчета ресурса колес с фактическими данными в условиях эксплуатации / Отчет по теме 80. Часть 7 / А. М. Орлова, А. А. Воробьев. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2017. — 23 с.

4. Воробьев А. А. Расчет назначенного срока службы цельнокатаных колес железнодорожного подвижного состава по критерию надежности / А. А. Воробьев, И. В. Федоров, Э. Ю. Чистяков и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2021. — Т. 18. — № 1. — С. 121–131. — DOI: 10.20295/1815-588X-2021-1-121-131.

5. Воробьев А. А. Испытания колесных сталей на износ и контактную усталость / А. А. Воробьев, Д. Е. Керенцев, И. В. Федоров // Известия ПГУПС. — 2017. — № 4. — С. 628–636.

6. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм. РД ВНИИЖТ 27.05.01—2017. — М.: ВНИИЖТ, 2018. — 242 с.

7. ГОСТ 10791—2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2012. — 53 с.

8. Федоров И. В. Подвижной состав для контрейлерных перевозок / И. В. Федоров, А. А. Воробьев, И. С. Горелов // Современные технологии, применяемые при обслуживании и ремонте автомобилей: сборник трудов национальной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. — 2019. — С. 269–9. ГОСТ 33783—2016. Колесные пары железнодорожного подвижного состава. Методы определения показателей прочности. — М.: Стандартинформ, 2016. — 68 с.

10. Трушин С. И. Метод конечных элементов. Теория и задачи: учебное пособие / С. И. Трушин. — М.: AGB, 2008. — 256 с.

11. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации. Утверждена Советом по железнодорожному транспорту Государств — участников Содружества. Протокол от 21–22 мая 2009 г. № 50. — М.: Транспорт, 2010. — 92 с.

12. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) с изменениями и дополнениями. — М.: ГосНИИВ — ВНИИЖТ, 1996. — 318 с.

13. Валинский О. С. Повышение эффективности эксплуатации колесных пар подвижного состава / О. С. Валинский, А. А. Воробьев, И. В. Федоров и др. // Транспорт Российской Федерации. — 2022. — № 4-5(101-102). — С. 30–34.

14. Федоров И. В. Исследование напряженного состояния в контакте «колесо — рельс» при наличии выщербины / И. В. Федоров, А. А. Воробьев, И. К. Самаркина и др. // Известия ПГУПС. — 2019. — Т. 6. — № 4. — С. 562–572.

Дата поступления: 01.08.2023

Решение о публикации: 30.08.2023

#### **Контактная информация:**

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доц.; 79219751198@yandex.ru

ФЕДОРОВ Игорь Владимирович — ст. преподаватель; fedorov281973@yandex.ru

КОНОГРАЙ Ольга Анатольевна — ст. преподаватель; konograisbp@mail.ru

МЕТЛЯКОВА Софья Александровна — аспирант; sofeasya@yandex.ru

МИГУЛИН Никита Константинович — аспирант; migulinnik@rambler.ru

## Procedure for determination of minimum permissible rim thickness of solid-rolled The Method of Determining the Minimum Permissible Rim Thickness of Solid-Rolled Wheels of Freight Cars in Operation

A. A. Vorobyov, I. V. Fedorov, O. A. Konograi, S. A. Metlyakova, N. K. Migulin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Vorobyov A. A., Fedorov I. V., Konograi O. A., Metlyakova S. A., Migulin N. K. The Method of Determining the Minimum Permissible Rim Thickness of Solid-Rolled Wheels of Freight Cars in Operation. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 85–99. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-85-99

### Summary

**Purpose:** Determination of the minimum allowable thickness of the rim of solid-rolled wheels of freight cars depending on the design and axial load. **Methods:** Methods of elasticity theory, methods of numerical solution of partial differential equations (finite element method) are used. **Results:** The minimum allowable thicknesses of the rims of solid-rolled wheels of freight cars have been determined, as well as the values of fatigue resistance factors for wheels manufactured according to drawing 13.45.1043-01A, 13.45.1011-143, 13.45.1399-207 with a rim thickness of 30 to 16 mm and various axial load. The calculations showed that for the wheels manufactured according to drawing 13.45.1043-01A, 13.45.1399-207, the minimum permissible rim thickness can be reduced to 16 mm. **Practical significance:** The dependence of the fatigue resistance coefficient on the rim thickness and axial load with an accuracy of up to 15% is obtained, as well as certain minimum permissible thicknesses of the rims of solid-rolled wheels will increase their service life.

**Keywords:** Wheel pair, wheel thread defect, wheel flange wear, rim thickness, finite element model.

### References

1. Vorob'ev A. A. *Prognozirovaniye resursa i sovershenstvovaniye tekhnologii remonta koles zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Forecasting the resource and improving the technology for repairing wheels of railway rolling stock: dis. ... Dr. Tech. Sciences]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2018, 289 p. (In Russian)

2. Orlova A. M., Vorob'ev A. A. *Bibliograficheskie issledovaniya voprosov intensivnosti iznosa i mekhanizmov obrazovaniya ustalostnogo vykrashivaniya rabochey poverkhnosti oboda v zavisimosti ot tipa podvizhnogo sostava, oseyoy nagruzki, rel'efa i profilya puti (pryamye, krivyye, pod''emy i uklony), skorostey dvizheniya i probega. Postanovka zadach dlya raschetnykh i eksperimental'nykh issledovaniy dlya profilya GOST 10791. Otchet po teme 80. Chast' 1* [Bibliographic studies of the issues of wear intensity and mechanisms of formation of fatigue chipping of the working surface of the rim depending on the type of rolling stock, axial load, relief and track profile (straight lines, curves, rises and slopes), speeds and mileage. Statement of problems for computational and experimental studies for the GOST 10791 profile. Report on topic 80. Part 1]. St. Petersburg: FGBOU VPO PGUPS Publ., 2014, 165 p. (In Russian)

3. Orlova A. M., Vorob'ev A. A. *Razrabotka raschetnoy metodiki otsenki resursa koles. Otsenka resursa koles OAO "VMZ" s uchetom rezul'tatov ispytaniy obrazov v zavisimosti ot svoystv materiala, konstruktsionnoy skorosti, osevoy nagruzki, varianta reprezentativnogo marshruta i parametrov promezhutochnykh tekhnologicheskikh obtochek s tsel'yu vosstanovleniya profilya koleasa. Sravnenie rezul'tatov rascheta resursa koles s fakticheskimi dannymi v usloviyakh ekspluatatsii. Otchet po teme 80. Chast' 7* [Development of a calculation methodology for assessing the service life of wheels. Assessment of the service life of OJSC "VMZ" wheels, taking into account the test results of samples depending on the properties of the material, design speed, axial load, representative route option and parameters of intermediate technological turnings in order to restore the wheel profile. Comparison of the results of calculating the wheel life with actual data under operating conditions. Report on topic 80. Part 7]. St. Petersburg: FGBOU VPO PGUPS Publ., 2017, 23 p. (In Russian)

4. Vorob'ev A. A., Fedorov I. V., Chistyakov E. Yu. et al. *Raschet naznachennogo sroka sluzhby tsel'nokatanykh koles zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava po kriteriyu nadezhnosti* [Calculation of the assigned service life of solid-rolled wheels of railway rolling stock according to the reliability criterion]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2021, vol. 18, Iss. 1, pp. 121–131. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-1-121-131. (In Russian)

5. Vorob'ev A. A., Kerentsev D. E., Fedorov I. V. *Ispytaniya kolesnykh staley na iznos i kontaktnyuyu ustalost'* [Testing wheel steels for wear and contact fatigue]. *Izvestiya PGUPS* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2017, Iss. 4, pp. 628–636. (In Russian)

6. *Rukovodyashchiy dokument po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kolesnykh par s buksovymi uzlami gruzovykh vagonov magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 (1524) mm. RD VNIIZhT 27.05.01—2017* [Guidance document on the repair and maintenance of wheel pairs with axle units of freight cars of mainline 1520 (1524) mm gauge railways. RD VNIIZhT 05.27.01—2017]. Moscow: VNIIZhT Publ., 2018, 242 p. (In Russian)

7. *GOST 10791—2011. Kolesa tsel'nokatanye. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 10791—2011. Solid wheels. Technical conditions]. Moscow: Standartinform Publ., 2012, 53 p. (In Russian)

8. Fedorov I. V., Vorob'ev A. A., Gorelov I. S. *Podvizhnoy sostav dlya kontreylernykh perevozok. Sovremennye tekhnologii, primenyaemye pri obsluzhivanii i remonte avtomobiley: sbornik trudov natsional'noy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Rolling stock for piggyback transportation. Modern technologies used in the maintenance and repair of cars: collection of proceedings of the national interuniversity scientific and technical conference students, undergraduates, graduate students and young scientists]. 2019, pp. 269–275. (In Russian)

9. *GOST 33783—2016. Kolesnye pary zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Metody opredeleniya pokazateley prochnosti* [GOST 33783—2016. Wheel pairs of railway rolling stock. Methods for determining strength indicators]. Moscow: Standartinform Publ., 2016, 68 p. (In Russian)

10. Trushin S. I. *Metod konechnykh elementov. Teoriya i zadachi: uchebnoe posobie* [Finite element method. Theory and tasks: textbook]. Moscow: AGB Publ., 2008, 256 p. (In Russian)

11. *Instruktsiya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu vagonov v ekspluatatsii. Utverzhdena Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu Gosudarstv — uchastnikov Sodruzhestva. Protokol ot 21–22 maya 2009 g. № 50* [Instructions for the maintenance of wagons in operation. Approved by the Railway Transport Council of the Commonwealth Member States. Minutes of May 21–22, 2009 № 50]. Moscow: Transport Publ., 2010, 92 p. (In Russian)

12. *Normy rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) s izmeneniyami i dopolneniyami* [Standards for the calculation and design of 1520 mm gauge railway carriages of the Ministry of Railways (non-self-propelled) with amendments and additions]. Moscow: GosNIIV — VNIIZhT Publ., 1996, 318 p. (In Russian)

13. Valinskiy O. S., Vorob'ev A. A., Fedorov I. V. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii kolesnykh par podvizhnogo sostava [Increasing the efficiency of operation of wheel pairs of rolling stock]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2022, Iss. 4-5(101-102), pp. 30–34. (In Russian)

14. Fedorov I. V., Vorob'ev A. A., Samarkina I. K. et al. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya v kontakte “koleso — rel's” pri nalichii vyshcherbiny [Study of the stress state in the “wheel — rail” contact in the presence of a hole]. *Izvestiya PGUPS* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2019, vol. 6, Iss. 4, pp. 562–572. (In Russian)

Received: August 01, 2023

Accepted: August 30, 2023

#### **Author's information:**

Aleksandr A. VOROBYOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor;  
79219751198@yandex.ru

Igor V. FEDOROV — Senior Lecturer; fedorov281973@yandex.ru

Olga A. KONOGRAI — Senior Lecturer; avataev@yandex.ru

Sofia A. METLYAKOVA — Postgraduate Student; sofeeasya@yandex.ru

Nikita K. MIGULIN — Postgraduate Student; migulinnik@rambler.ru

УДК 621.314.5

## Моделирование динамических режимов работы электроприводов с системой векторного управления синхронным двигателем

А. А. Пугачев, Н. В. Чуприна

Брянский государственный технический университет, Российская Федерация, 241035, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

**Для цитирования:** Пугачев А. А., Чуприна Н. В. Моделирование динамических режимов работы электроприводов с системой векторного управления синхронным двигателем // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 100–113. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-100-113

### Аннотация

**Цель:** Целью работы является сравнительная оценка динамических процессов в электроприводах с системой векторного управления синхронными двигателями с постоянными магнитами и различными методами модуляции напряжения статора. Для достижения этой цели приведено математическое описание синхронного двигателя во вращающейся системе координат  $dq$ , разработана математическая модель системы векторного управления. В модели системы векторного управления учтена развязка контуров регулирования тока статора, предложены два варианта формирования задания на ток по оси  $d$ , обеспечивающего эффективность процессов преобразования энергии при частотах вращения ниже номинального значения, в зависимости от конструкции ротора двигателя. Приведены алгоритмы скалярной широтно-импульсной и пространственно-векторной модуляции напряжения статора двигателя для преобразователя частоты с двухуровневым автономным инвертором напряжения. **Методы:** При разработке математических моделей и алгоритмов использованы методы теории электропривода и теории автоматического управления. Разработанные математические модели и алгоритмы реализованы в программном комплексе *Matlab Simulink*. **Результаты:** Приведены результаты моделирования динамических процессов в электроприводах (механические характеристики, токи статора, коэффициент гармонических искажений тока статора), которые показали работоспособность разработанных моделей и алгоритмов. **Практическая значимость:** Выбор типа модуляции не оказывает влияния на механические характеристики электропривода, но влияет на гармонический состав тока статора. Наибольший эффект от применения алгоритмов пространственно-векторной модуляции проявляется при пониженных значениях частоты тока статора и частичных нагрузках на валу ротора.

**Ключевые слова:** Синхронные двигатели, постоянные магниты, модуляция, коэффициент гармонических искажений, векторное управление, математическое моделирование.

### Введение

Дальнейшее развитие тягового электропривода в одинаковой степени связано как с совершенствованием алгоритмов и систем управления тяговым преобразователем и тяговым двигателем, так и с переходом на новые топологии и (или) элементную базу преобразователей и применением перспективных типов электрических машин. В настоящее время наиболее распространенным является электропривод, выполненный по схеме «полупроводниковый преобразователь

частоты (ПЧ) — асинхронный двигатель (АД)», который получил широкое применение и на тяговом подвижном составе. Анализ современного состояния исследований в этой области показывает, что наибольший интерес представляет замена АД на синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ), который обладает лучшими массогабаритными и энергетическими характеристиками [1]. Преимуществом такого решения является еще и то, что конструкции статоров (и их обмоток) у таких двигателей одинаковы, следовательно, возможно применение тяговых преобразователей с идентичными структурами силовой части. Вместе с этим структура информационного канала таких электроприводов будет отличаться, так как различные конструкции роторов (трехфазная обмотка или беличья клетка на роторе АД и постоянные магниты на роторе СДПМ) обуславливают различные особенности математического описания процессов преобразования энергии в рассматриваемых типах двигателей.

Наличие контакта «колесо — рельс» в механической части тягового привода накладывает дополнительные требования к системе управления электропривода в части обеспечения высокой точности и быстродействия регулирования момента двигателя для формирования желаемых переходных процессов и уменьшения вероятности возникновения явлений юза и боксования. Это предопределило необходимость использования в тяговых электроприводах высокодинамичных систем векторного управления и прямого управления моментом [2]. Системы прямого управления моментом обладают большим быстродействием момента, так как в контуре его регулирования применен релейный регулятор, но системы векторного управления позволяют осуществлять непосредственный контроль и регулирование токов двигателя, что позволяет строить на их основе системы управления с контролем температуры обмоток [3].

Для формирования напряжения статора двигателей переменного тока в электроприводах с ПЧ со звеном постоянного тока применяют различные алгоритмы управления автономными инверторами напряжения [4–7]. От выбора этого алгоритма зависят прежде всего эффективность преобразования электроэнергии инвертором напряжения (потери в силовых ключах, их тепловое состояние) и гармонический состав напряжения и тока статора двигателя. До сих пор широкое применение в электроприводах находят алгоритмы скалярной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения, достоинства и недостатки которых хорошо изучены. Альтернативным и более современным способом управления инвертором напряжения является использование пространственно-векторной модуляции (ПВМ) напряжения, алгоритмы которой позволяют минимизировать потери в силовых ключах, уменьшать коэффициент гармонических искажений тока и т. д.

Таким образом, анализ проведенных исследований показал актуальность синтеза и исследования высокодинамичных систем управления электроприводов с СДПМ. Далее будут приведены результаты сравнительной оценки

электроприводов с системой векторного управления СДПМ со скалярной и векторной модуляциями напряжения статора, полученные на основе имитационного моделирования динамических режимов работы.

### Математическое описание системы векторного управления СДПМ

Подробный вывод математической модели СДПМ с обоснованием выбора системы координат и принятых допущений показан в работах [8–10]. Не вдаваясь в подробности, приведем только основные уравнения и зависимости. За базовую систему координат при описании СДПМ и системы векторного управления выбрана система  $dq$ , вращающаяся синхронно с ротором.

Уравнения напряжения и потокосцепления выглядят следующим образом:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_a \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_a \\ 0 \end{bmatrix},$$

где  $u_d, u_q$  — напряжения статора;  $r$  — сопротивление статора;  $L_d, L_q$  — индуктивности статора;  $i_d, i_q$  — токи статора  $dq$ ;  $\omega$  — электрическая частота вращения ротора;  $\psi_a$  — потокосцепление ротора;  $\psi_d, \psi_q$  — потокосцепления статора.

Электромагнитный момент СДПМ может быть записан в следующем виде:

$$M_{\varepsilon} = \frac{3}{2} N (\psi_a i_q - (L_q - L_d) i_d i_q), \quad (3)$$

где  $N$  — число пар полюсов.

Для выполнения преобразования из трехфазной неподвижной системы координат  $abc$ , в которой работает СДПМ, в систему координат  $dq$ , в которой выполнено описание работы электропривода, необходимо знать положение ротора двигателя  $\theta$ , которое вычисляется следующим образом:

$$\theta = \int \omega dt. \quad (4)$$

Переход от одной системы координат в другую осуществляется с помощью тригонометрических преобразований. Преобразование токов статора из системы координат  $abc$  в систему  $dq$  можно выполнить так:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Преобразование параметров из системы координат  $dq$  в неподвижную двух-фазную систему координат  $\alpha\beta$  выполняется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin(\theta) & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для систем векторного управления синхронным двигателем по аналогии с системами векторного управления АД необходимо компенсировать взаимное влияние контуров регулирования токов статора  $i_d$  и  $i_q$ , для чего в систему управления вводятся напряжения  $u_{p,d}$  и  $u_{p,q}$ , которые вычисляются по выражениям:

$$u_{\delta,d} = \omega L_q i_q, \quad (7)$$

$$u_{\delta,q} = \omega L_d i_d + \omega \psi_a, \quad (8)$$

На рис. 1 представлена структурная схема системы векторного управления СДПМ.

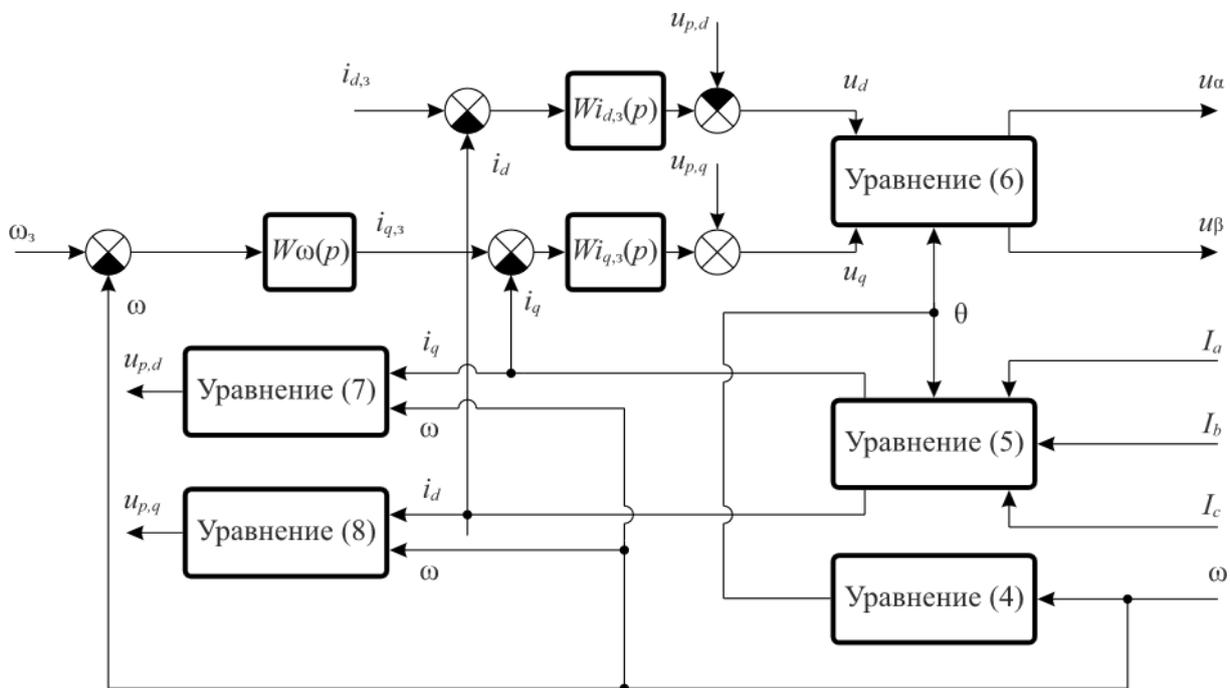


Рис. 1. Структурная схема системы векторного управления СДПМ

Система, представленная на рис. 1, содержит три замкнутых контура регулирования, в которых находятся регуляторы скорости  $W\omega(p)$  и токов  $Wi_d(p)$  и  $Wi_q(p)$ . Расчет этих регуляторов производится согласно выбранным настройкам соответствующих контуров [11] и проблем при синтезе систем векторного управления не вызывает. Индексом «з» на рис. 1 и далее обозначены сигналы задания. Сигналы токов  $i_a, i_b, i_c$  поступают от датчиков тока статора, сигнал частоты вращения  $\omega$  — от датчика частоты вращения ротора.

Для улучшения энергетических характеристик электропривода в первой зоне (т. е. с частотами вращения ниже номинального значения) целесообразно сигнал задания на ток статора  $i_{d,3}$  формировать с учетом конструкции ротора. Для двигателей с магнитной симметрией ( $L_d = L_q$ ) ток  $i_{d,3} = 0$ . Для двигателей с магнитной несимметрией ( $L_d \neq L_q$ ) ток  $i_{d,3}$  может быть вычислен как:

$$i_{d,3} = \frac{\Psi_a}{2(L_d - L_q)} - \sqrt{\frac{\Psi_a^2}{4(L_d - L_q)^2} + i_c^2}. \quad (9)$$

Очевидно, что для корректной работы системы управления при реализации задания тока  $i_{d,3}$  по выражению (9) необходимо в полной мере учитывать изменение индуктивностей, вызванное насыщением магнитной системы, и потокосцепления ротора, вызванное нагревом магнитов.

### Математическое описание автономного инвертора напряжения с различными алгоритмами модуляции

Функциональная схема автономного инвертора напряжения показана на рис. 2, а, формируемые им векторы напряжения — на рис. 2, б.

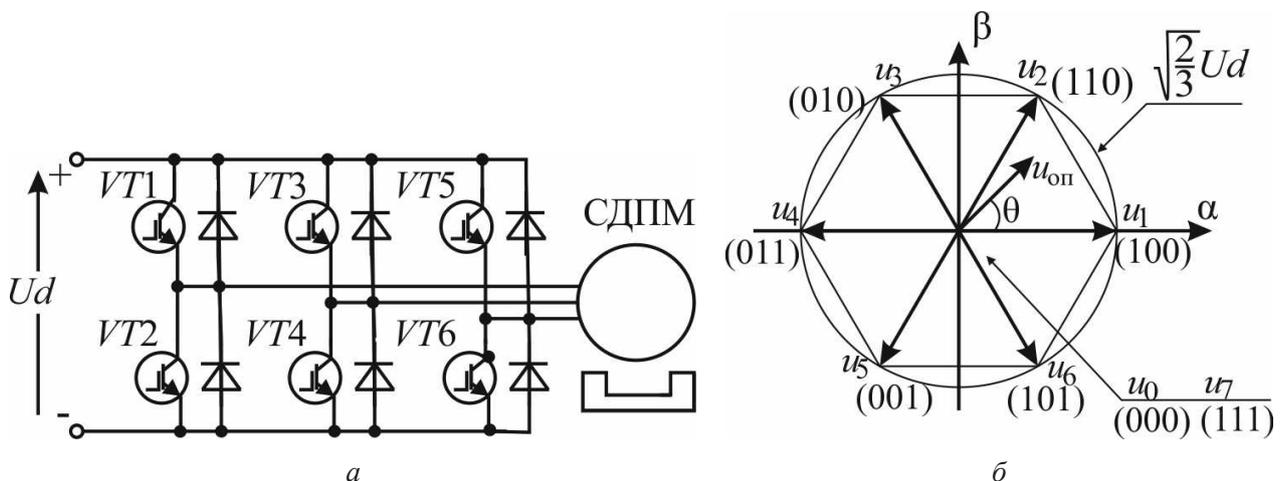


Рис. 2. Функциональная схема автономного инвертора частоты (а) и векторы его выходного напряжения (б)

Каждый из восьми векторов напряжения на рис. 2, б можно записать так:

$$u_k = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3}} U_d e^{j(k-1)\frac{\pi}{3}}, & \text{если } k = 1, 2 \dots 6; \\ 0, & \text{если } k = 0, 7. \end{cases} \quad (10)$$

Каждый вектор напряжения  $u_k$  формируется соответствующей комбинацией функций переключения  $S_k = (S_{k1} S_{k2} S_{k3})$ , где  $S_{k1} = (S_{VT1} S_{VT2})$ ,  $S_{k2} = (S_{VT3} S_{VT4})$ ,  $S_{k3} = (S_{VT5} S_{VT6})$ , так, как показано на рис. 2, б. Единичное значение функции переключения соответствует подключению текущей фазы к положительному потенциалу источника постоянного напряжения  $U_d$ , нулевое значение — к отрицательному. Например, для первой стойки транзисторов  $VT1, VT2$  имеем: если  $S_{k1} = 1$ , то  $(S_{VT1} S_{VT2}) = (1 \ 0)$ ; если  $S_{k1} = 0$ , то  $(S_{VT1} S_{VT2}) = (0 \ 1)$ . Другие значения функций коммутации в двухуровневых инверторах запрещены.

Угол вектора заданного напряжения определяется так:

$$\theta = \operatorname{tg} \left( \frac{u_\alpha}{u_\beta} \right), \theta \in [0, 2\pi]. \quad (11)$$

Номер сектора напряжения  $n$  найдем из неравенства:

$$(n - 1) \cdot 60^\circ < \theta \leq 2 \cdot n \cdot 60^\circ. \quad (12)$$

Алгоритм классической скалярной ШИМ хорошо известен и трудностей при реализации не вызывает. Вкратце его можно описать следующим образом.

1. Сравнение сигнала задания и опорного напряжения (например, треугольной формы). Для скалярной ШИМ сигналы задания — это сигналы напряжения  $u_a, u_b, u_c$ , определяемые из:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}.$$

2. Формирование функции переключения  $S_k$  в соответствии с результатом сравнения сигналов для каждой фазы напряжения статора.

Для синтеза алгоритма ПВМ необходимо применить ряд дополнительных математических преобразований с целью определения очередности коммутации силовых ключей  $VT1-VT6$  в зависимости от сектора напряжения  $n$ .

Значение выходного напряжения инвертора при использовании ПВМ определяется временем включения граничных векторов для каждого сектора и одного из нулевых векторов. Выбор нулевого вектора осуществляется на основании принципа соседнего кодирования, при котором обеспечивается изменение только одной функции переключения. Если применить симметричную последовательность коммутации и начинать каждый первый полупериод с нулевого вектора  $u_0$ , то первым ненулевым вектором будет нечетный вектор из текущего сектора, вторым — четный, после четного вектора идет второй нулевой вектор  $u_7$ . Второй полупериод при симметричной последовательности получается путем зеркального отражения первого.

С учетом тригонометрического расположения векторов (рис. 2, б) зависимость вектора напряжения задания в осях  $\alpha\beta$  от граничных векторов примет вид:

$$\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \frac{T}{2} = u_k T_k + u_{k+1} T_{k+1}, \quad (13)$$

где  $T_k$  и  $T_{k+1}$  — длительность включения векторов  $u_k$  и  $u_{k+1}$  в текущем полупериоде коммутации.

При условии постоянства всех векторов напряжения за период коммутации уравнения для длительностей включения примут вид:

$$T_k = \frac{u_c \sqrt{2} T}{\pi U_d} \left( \sin \frac{n\pi}{3} \cos(n\omega_s T) - \cos \frac{n\pi}{3} \sin(n\omega_s T) \right); \quad (14)$$

$$T_{k+1} = \frac{u_3 \cdot \sqrt{2} T}{\pi U_d} \left( -\sin \frac{(n-1)\pi}{3} \cos(n\omega_s T) - \cos \frac{(n-1)\pi}{3} \sin(n\omega_s T) \right), \quad (15)$$

где  $\omega_s$  — частота вращения вектора напряжения  $u_3$ ,  $\omega_s = 2\pi f_s$ ,  $f_s$  — частота тока статора СДПМ (как нагрузки автономного инвертора напряжения),

$$u_3 = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}.$$

Длительность включения нулевых векторов делится на равные части между векторами  $u_0$  и  $u_7$  и определяется так:

$$T_0 = T - 2 \cdot (T_k + T_{k+1}). \quad (16)$$

Результирующая последовательность переключающих функций и векторов выходного напряжения для каждого сектора сведена на рис. 3.

Таким образом, алгоритм ПВМ может быть записан следующим образом:

1. Вычисление угла заданного вектора напряжения статора по уравнению (11).
2. Вычисление сектора заданного вектора напряжения статора по формуле (12).
3. Вычисление длительности функций переключения по формулам (13) — (15).
4. Формирование последовательности переключающих функций в соответствии с рис. 3.

Отметим, что для ПВМ входными сигналами в данном случае являются напряжения  $u_\alpha$  и  $u_\beta$ , являющиеся выходными сигналами для системы векторного управления (рис. 1).

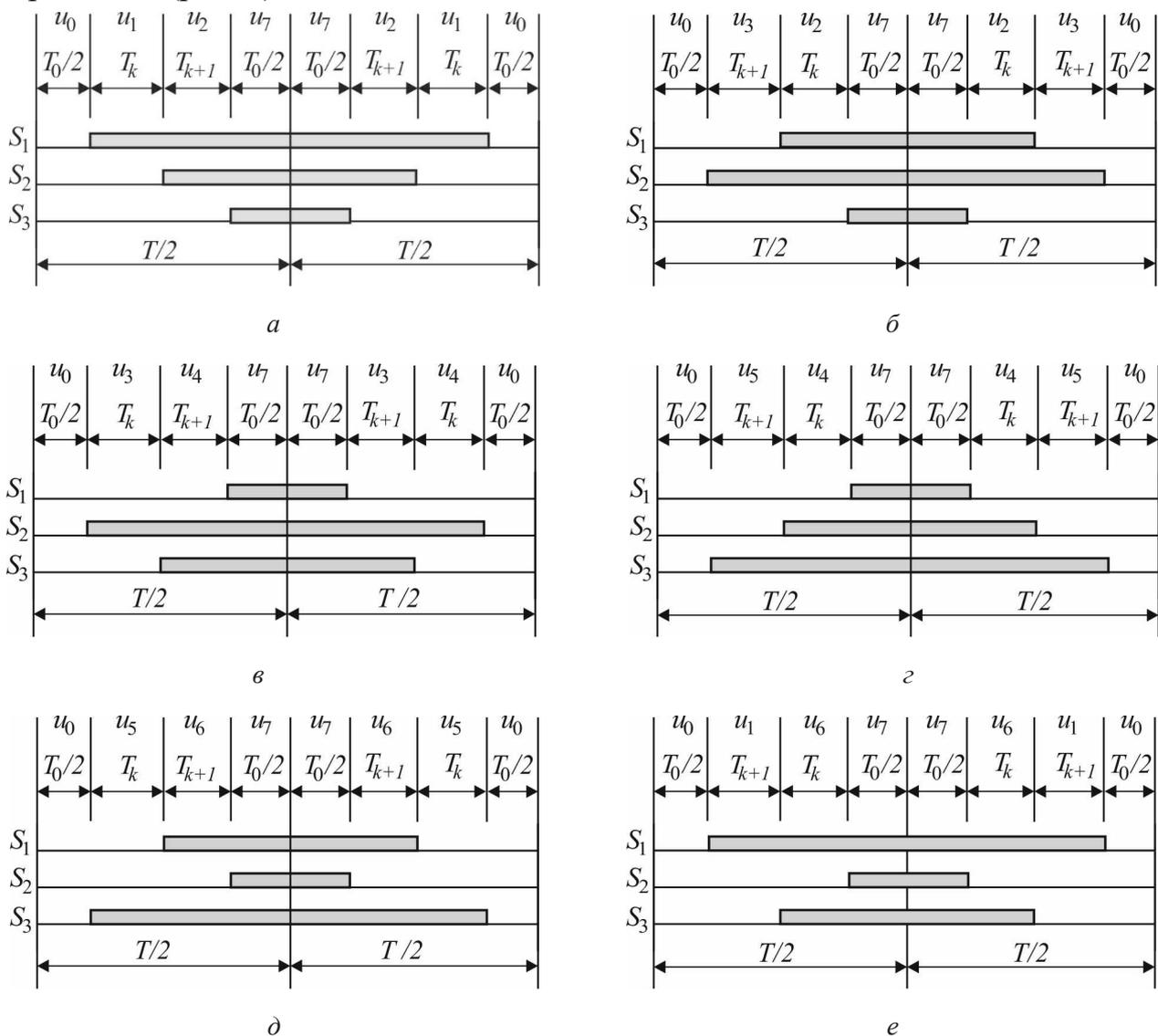


Рис. 3. Временные диаграммы выходных векторов автономного инвертора напряжения и функций переключения для первого (*a*), второго (*б*), третьего (*в*), четвертого (*г*), пятого (*д*) и шестого (*e*) секторов

## Результаты моделирования и их обсуждение

Моделирование электропривода выполнено в программном комплексе Matlab Simulink. Модель СДПМ реализована по уравнениям (1) — (3), модель системы векторного управления — согласно схеме (рис. 1), модели систем управления автономным инвертором — согласно приведенным в предыдущем разделе алгоритмам. Параметры СДПМ: мощность  $P = 133$  кВт,  $\omega = 314$  рад/с,  $N = 2$ ,  $U_d = 540$  В,  $r = 0,013$  Ом,  $L_d = 0,0005$  Гн,  $L_q = 0,0015$  Гн,  $J = 0,5$  кг · м<sup>2</sup>,  $\psi_a = 0,2$  Вб,  $\psi_s = 0,49$  Вб. Параметры регуляторов системы векторного управления:

$$W\omega(p) = 75 + \frac{1}{300p},$$

$$Wi_d(p) = 100 + \frac{1}{150p},$$

$$Wi_q(p) = 125 + \frac{1}{150p}.$$

На рис. 4, *а* представлены временные зависимости частоты вращения  $\omega(t)$  и момента  $M(t)$ , на рис. 4, *б* — временные зависимости токов  $i_d(t)$  и  $i_q(t)$  (*б*). Графики (рис. 4) получены при использовании алгоритма ПВМ при частоте коммутации  $f_k = 12$  кГц. Для примера на рис. 5 показаны зависимости коэффициента гармонических искажений (КГИ) тока статора от частоты коммутации силовых ключей  $f_k$  (рис. 5, *а*) и от частоты тока статора  $f_s$  (рис. 5, *б*) для автономного инвертора напряжения с ПВМ. Аналогичные зависимости для автономного инвертора напряжения с ШИМ показаны на рис. 5, *в*, *г*.

Отметим, что качественно и количественно приведенные графики переходных процессов в электроприводе (рис. 4) совпадают для двух рассматриваемых типов модуляции, различия наблюдаются лишь в различной степени искажении формы токов и момента. Согласно выполненному анализу гармонического состава тока статора КГИ для электропривода с системой векторного управления и алгоритмом ПВМ незначительно ниже, чем КГИ тока статора для электропривода с алгоритмом ШИМ, причем с увеличением частоты коммутации и частоты тока статора эта разница уменьшается. Эффект от применения ПВМ возрастает с уменьшением нагрузки на валу двигателя. Моделирование электропривода с СДПМ с магнитной симметрией показало аналогичные результаты при условии задания  $i_{d,3} = 0$ .

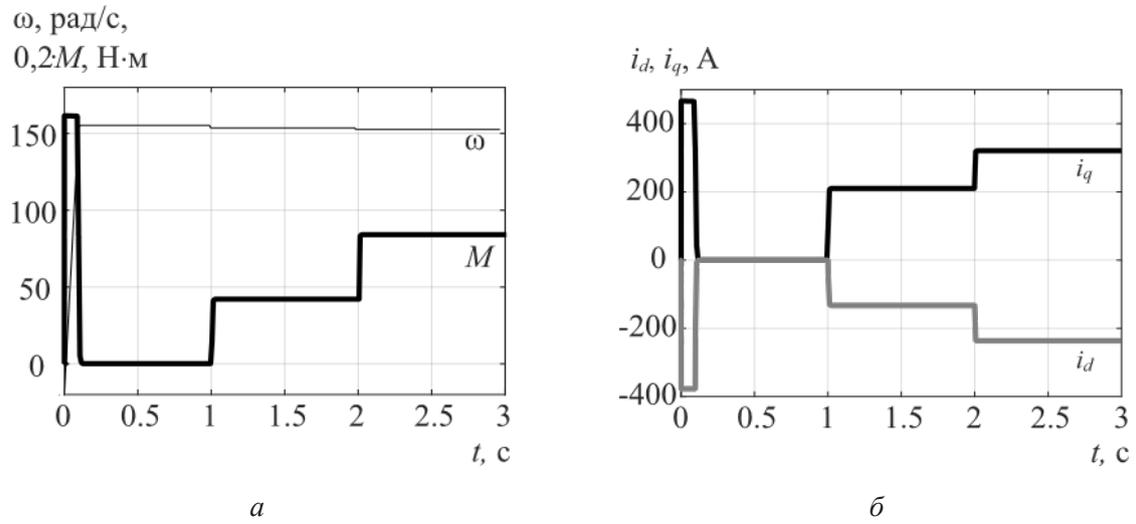


Рис. 4. Переходные процессы в электроприводе

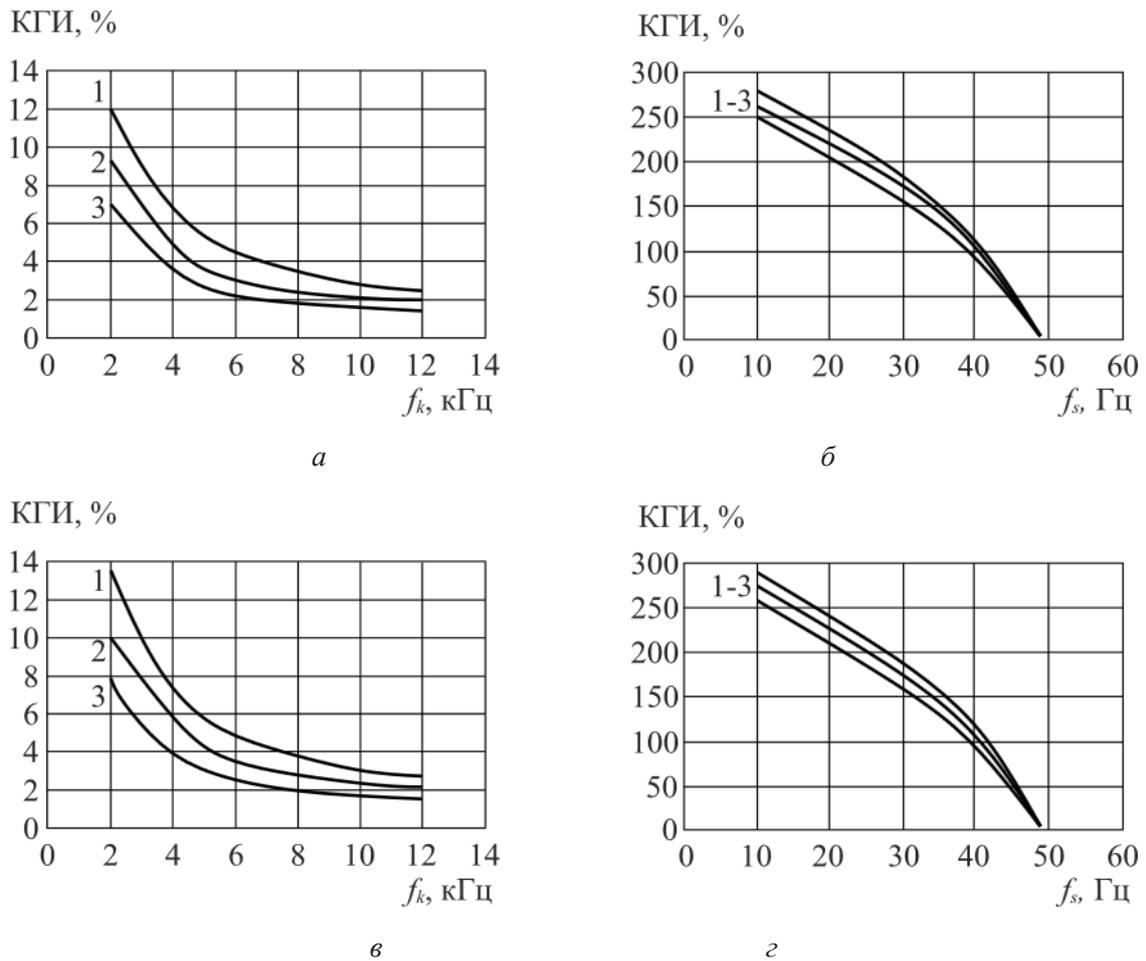


Рис. 5. КГИ тока статора в установившемся режиме:  
 1 —  $M = 0,3M_{\text{НОМ}}$ ; 2 —  $M = 0,5M_{\text{НОМ}}$ ; 3 —  $M = 0,7M_{\text{НОМ}}$

## Заключение

Разработано математическое описание электропривода с системой векторного управления СДПМ с двумя вариантами модуляции напряжения статора — ШИМ и ПВМ, реализация и проверка адекватность которого осуществлена посредством Matlab Simulink. В результате проведенного моделирования установлена работоспособность синтезированных электроприводов для разных типов СДПМ, показано, что применение описанного алгоритма ПВМ требует больших информационных и аппаратных ресурсов по отношению к ШИМ и обеспечивает улучшение формы тока статора (применение ПВМ приводит к уменьшению КГИ тока статора на 25 % по отношению к ШИМ) в зоне частичных нагрузок электропривода с системой векторного управления.

## Библиографический список

1. Колпахчян П. Г. Особенности управления синхронными тяговыми двигателями с постоянными магнитами на роторе на электроподвижном составе / П. Г. Колпахчян, М. С. Подберезная, А. Р. Шайхiev // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2018. — № 2(70). — С. 132–137.
2. Бурков А. Т. Системы управления тяговым приводом современных локомотивов / А. Т. Бурков, О. С. Валинский, А. М. Евстафьев и др. // Электротехника. — 2019. — № 10. — С. 33–36.
3. Космодамианский А. С. Система управления тягового электропривода с контролем температуры теплонагруженных элементов / А. С. Космодамианский, Л. М. Клячко, В. И. Воробьев и др. // Электротехника. — 2014. — № 8. — С. 38–43.
4. Quan H. Study of a novel over-modulation technique based on space-vector PWM / H. Quan, Z. Gang, C. Jie et al. // IEEE Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM). — 2011. — Pp. 295–298. — DOI: 10.1109/CDCIEM.2011.187.
5. Leedy A. W. Harmonic analysis of a space vector PWM inverter using the method of multiple pulses / A. W. Leedy, R. M. Nelms // IEEE Transactions on Industrial Electronics, July 2006. — Vol. 4. — Pp. 1182–1187. — DOI: 10.1109/ISIE.2006.295805.
6. Kumar K. V. Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverter / K. V. Kumar, P. A. Michael, J. P. John et al. // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, July 2010. — Vol. 5. — Iss. 7. — Pp. 61–74.
7. Sabarad J. Comparative analysis of SVPWM and SPWM techniques for multilevel inverter / J. Sabarad, G. H. Kulkarni // International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE). — 2015. — DOI: 10.1109/ICPACE.2015.7274949.
8. Чуприна Н. В. Моделирование системы векторного управления тяговым синхронным двигателем с постоянными магнитами / Н. В. Чуприна, А. А. Пугачев // Электротехнические системы и комплексы. — 2022. — № 2(55). — С. 10–17. — DOI: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-10-17.

9. Dutta C. Comparison between conventional and loss d-q model of PMSM / C. Dutta, S. M. Tripathi // International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems (ICETEESES), Sultanpur, India. — 2016. — Pp. 256–260. — DOI: 10.1109/ICETEESES.2016.7581370.

10. Chen X. A High-Fidelity and Computationally Efficient Model for Interior Permanent-Magnet Machines Considering the Magnetic Saturation, Spatial Harmonics, and Iron Loss Effect / X. Chen, J. Wang, B. Sen et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2015. — Vol. 62. — Iss. 7. — Pp. 4044–4055. — DOI: 10.1109/TIE.2014.2388200.

11. Анучин А. С. Системы управления электроприводов / А. С. Анучин. — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 373 с.

Дата поступления: 20.07.2023

Решение о публикации: 31.08.2023

#### **Контактная информация:**

ПУГАЧЕВ Александр Анатольевич — д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой; alexander-pugachev@rambler.ru

ЧУПРИНА Николай Валентинович — аспирант; nikochuprina212@yandex.ru

## **Dynamic Modes Simulation of Synchronous Motor Vector Control Electric Drive**

**A. A. Pugachev, N. V. Chuprina**

Bryansk State Technical University, 7, 50 let Oktyabrya boul., Bryansk, 241035, Russian Federation

**For citation:** Pugachev A. A., Chuprina N. V. Dynamic Modes Simulation of Synchronous Motor Vector Control Electric Drive. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 100–113. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-100-113

### **Summary**

**Purpose:** The purpose of the work is a comparative assessment of dynamic processes in electric drives with a vector control system for permanent magnets synchronous motors and various methods of stator voltage modulation. To achieve this purpose, a mathematical description of a synchronous motor in a rotating  $dq$  coordinate system is given, and a mathematical model of a vector control system is developed. The model of the vector control system takes into account the decoupling of stator current control loops and proposes two options for generating a current reference along the d-axis, ensuring the efficiency of energy conversion processes at rotation speeds below the nominal value, depending on the design of the motor rotor. Algorithms for scalar pulse-width and space-vector modulation of motor stator voltage for a frequency converter with a two-level autonomous voltage inverter are presented. **Methods:** When developing mathematical models and algorithms, methods from the theory of electric drive and the theory of automatic control have been used. The developed mathematical models and algorithms are implemented in the *Matlab Simulink* software package. **Results:** The results of modeling dynamic processes in electric

drives (mechanical characteristics, stator currents, stator current total harmonic distortion) are presented, which have shown the performance of the developed models and algorithms. **Practical significance:** The choice of modulation type does not affect the mechanical characteristics of the electric drive, but does affect the harmonic composition of the stator current. The greatest effect from the use of space-vector modulation algorithms is manifested at reduced values of the frequency of the stator current and partial load torque on the rotor shaft.

**Keywords:** Synchronous motors, permanent magnets, modulation, total harmonic distortion, vector control, simulation.

## References

1. Kolpakhch'yan P. G., Podbereznaya M. S., Shaykhiev A. R. Osobennosti upravleniya sinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami s postoyannymi magnitami na rotore na elektropodvizhnom sostave [Features of control of synchronous traction motors with permanent magnets on the rotor on electric rolling stock]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University]. 2018, Iss. 2(70), pp. 132–137. (In Russian)
2. Burkov A. T., Valinskiy O. S., Evstaf'ev A. M. Sistemy upravleniya tyagovym privodom sovremennykh lokomotivov [Traction drive control systems for modern locomotives]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2019, Iss. 10, pp. 33–36. (In Russian)
3. Kosmodamianskiy A. S., Klyachko L. M., Vorob'ev V. I. et al. Sistema upravleniya tyagovogo elektroprivoda s kontrolem temperatury teplonagruzhennykh elementov [Control system for a traction electric drive with temperature control of heat-loaded elements]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2014, Iss. 8, pp. 38–43. (In Russian)
4. Quan H., Gang Z., Jie C. et al. Study of a novel over-modulation technique based on space-vector PWM. *IEEE Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM)*, 2011, pp. 295–298. DOI: 10.1109/CDCIEM.2011.187.
5. Leedy A. W., Nelms R. M. Harmonic analysis of a space vector PWM inverter using the method of multiple pulses. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, July 2006, vol. 4, pp. 1182–1187. DOI: 10.1109/ISIE.2006.295805.
6. Kumar K. V., Michael P. A., John J. P. et al. Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverter. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, July 2010, vol. 5, Iss. 7, pp. 61–74.
7. Sabarad J., Kulkarni G. H. Comparative analysis of SVPWM and SPWM techniques for multilevel inverter. *International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)*, 2015. DOI: 10.1109/ICPACE.2015.7274949.
8. Chuprina N. V., Pugachev A. A. Modelirovanie sistemy vektornogo upravleniya tyagovym sinkhronnym dvigatelem s postoyannymi magnitami [Modeling of a vector control system for a traction synchronous motor with permanent magnets]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes]. 2022, Iss. 2(55), pp. 10–17. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-10-17. (In Russian)

9. Dutta C., Tripathi S. M. Comparison between conventional and loss d-q model of PMSM. International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems (ICETEESES), Sultanpur, India, 2016, pp. 256–260. DOI: 10.1109/ICETEESES.2016.7581370.

10. Chen X., Wang J., Sen B. et al. A High-Fidelity and Computationally Efficient Model for Interior Permanent-Magnet Machines Considering the Magnetic Saturation, Spatial Harmonics, and Iron Loss Effect. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, vol. 62, Iss. 7, pp. 4044–4055. DOI: 10.1109/TIE.2014.2388200.

11. Anuchin A. S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow: MEI Publ., 2015, 373 p. (In Russian)

Received: July 20, 2023

Accepted: August 31, 2023

**Author's information:**

Alexander A. PUGACHEV — Dr. Sci. in Engineering, Head of the Department “Industrial Electronic and Electrical Engineering”; alexander-pugachev@rambler.ru

Nikolay V. CHUPRINA — Postgraduate Student; nikochuprina212@yandex.ru

УДК 621.313 + 06

## Энергетический комплекс на базе высокооборотной электрической машины

М. С. Подберезная<sup>1</sup>, П. Г. Колпахчян<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Подберезная М. С., Колпахчян П. Г. Энергетический комплекс на базе высокооборотной электрической машины // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 114–132. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-114-132

### Аннотация

**Цель:** Целью настоящего исследования является рассмотрение вопросов проектирования высокооборотных электрогенераторов, используемых совместно с газовыми микротурбинами. **Методы:** Для решения поставленных задач были использованы теория электрических машин; метод конечных элементов; теория автоматического управления; методы математического анализа, математического и схемотехнического моделирования; численное моделирование на ПЭВМ с использованием программных комплексов FEMM и Matlab Simulink. Исследования проводились на экспериментальных образцах высокооборотного электрогенератора и подтверждены результатами испытаний в составе энергетического комплекса на основе газовой микротурбины в 2019 г. **Результаты:** Разработан комплекс научно обоснованных технических решений по проектированию высокооборотного электрогенератора с системой управления энергетического комплекса на базе микрогазовой турбины. В результате разработан и изготовлен высокооборотный электрогенератор для газовой микротурбины с мощностью 100 кВт и частотой вращения 100 000 об/мин. При проектировании выбран электрогенератор асинхронного типа с массивным ротором. Особенностью разработанной конструкции является применение пятифазной обмотки статора. Разработана система управления экспериментального образца высокооборотного электрогенератора для микро-ГТУ. **Практическая значимость** заключается в разработке методов и алгоритмов проектирования высокооборотного генераторного оборудования для микро-ГТУ. Выработаны рекомендации по выбору типа и конфигурации высокооборотного электрогенератора для электрического комплекса на базе микрогазовой турбины. Предложена методика расчета параметров схемы замещения высокооборотного электрогенератора, позволяющая определять параметры схемы замещения по известной конфигурации активного слоя на этапе проектирования.

**Ключевые слова:** Высокооборотный электрогенератор, система управления, асинхронная электрическая машина с массивным ротором, электромеханические процессы, компьютерное моделирование.

### Введение

Распределенная генерация электроэнергии на основе автономных энергетических комплексов малой мощности является одним из активно развивающихся направлений энергетики. Особенно актуальным применение такого подхода является для энергоснабжения удаленных объектов, а также при наличии значительного количества потребителей малой мощности, распределенных по большой площади. Одним из ключевых элементов таких систем являются генерирующие установки малой и средней мощности, которые можно разместить в непосредственной близости от потребителей энергии. Наиболее подходящим типом генерирующих устройств для рассматриваемых энергетических систем

являются микрогазотурбинные установки (микро-ГТУ). Их работа возможна как на природном или сжиженном газе, так и на биогазе или других видах газообразного топлива, что делает возможности использования местных энергетических ресурсов.

Эффективность микро-ГТУ во многом определяется частотой вращения турбины. В востребованном диапазоне мощностей 50–200 кВт наилучшие показатели достигаются при частоте вращения порядка 200 000 об/мин. В реальных системах частота вращения микро-ГТУ ограничивается высокооборотным электрогенератором (ЭГ), который располагается на общем валу с газовой турбиной. Повышение частоты вращения высокооборотного ЭГ позволяет существенно повысить эффективность микро-ГТУ. При мощности 100 кВт большинство существующих высокооборотных ЭГ работают с частотой вращения 60 000 об/мин. Поэтому актуальным является создание высокооборотного ЭГ мощностью 100 кВт и частотой вращения 100 000 об/мин. В связи с этим в статье рассматриваются вопросы, возникающие при разработке такого генератора.

Высокая частота вращения газовой микротурбины делает невозможным непосредственное питание потребителей и совместную работу с сетью промышленной частоты. Применение непосредственного преобразователя частоты или матричного преобразователя не позволяет обеспечить надежную работу системы и высокое качество электроэнергии на выходе генератора из-за наличия высших гармоник в выходном напряжении и проблем с синхронизацией работы нескольких генераторов друг с другом и с сетью. Поэтому в рассматриваемом высокооборотном электрогенераторе используется двойное преобразование электроэнергии, с явно выраженным звеном постоянного тока. В этом случае в его состав входят электрическая машина, выполняющая роль электромеханического преобразователя, активный выпрямитель и сетевой инвертор с общим звеном постоянного тока, система управления. Высокооборотный генератор является электротехническим комплексом, структура которого приведена на рис. 1.

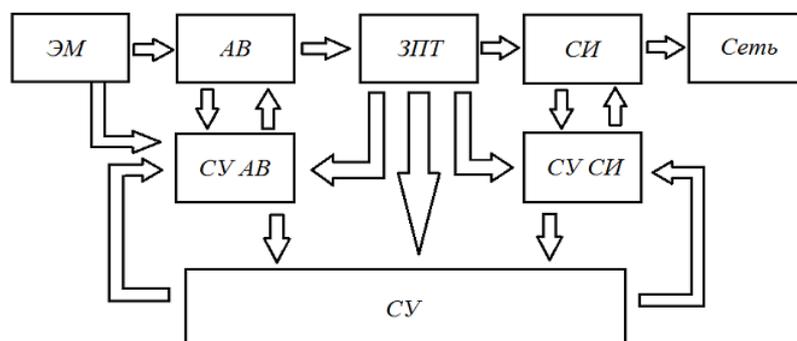


Рис. 1. Структурная схема высокооборотного электрогенератора энергетического комплекса на базе микро-ГТУ

## 1. Выбор типа электрической машины

Основной проблемой при разработке высокооборотной электрической машины (ЭМ) является обеспечение прочности конструкции. Наиболее сложным узлом являются ротор и опоры вала (подшипники), динамические свойства и прочность которых определяют допустимую частоту вращения.

Наилучшими удельными характеристиками обладают ЭМ с высококоэрцитивными редкоземельными постоянными магнитами (ПМ) на роторе. ПМ такого типа обладают хорошей прочностью при работе «на сжатие», но практически не допускают нагрузки «на растяжение». Расчеты толщины бандажа и прочности ротора для ЭМ с ПМ на 100 кВт и частотой вращения до 150 000 об/мин более подробно рассмотрены в статье [1]. Анализ полученных расчетных данных показал, что при частоте вращения выше 60 000 об/мин невозможно получить мощность генератора 100 кВт. Это происходит из-за того, что для обеспечения прочности требуется увеличение толщины бандажа. В результате возрастает немагнитный зазор. В этом случае увеличение высоты ПМ практически не приводит к росту мощности ЭМ, так как приводит к еще большему увеличению толщины бандажа. В результате, при неизменной линейной нагрузке, как следует из теории ЭМ [2], мощность не возрастает, так как определяется индукцией в воздушном зазоре, снижающейся при увеличении немагнитного зазора. На рис. 2. приведена зависимость предельной мощности высокооборотной ЭМ с ПМ на роторе в зависимости от частоты вращения [1].

В качестве альтернативы синхронной электрической машины с постоянными магнитами на роторе была рассмотрена асинхронная электрическая машина с массивным ротором. Одним из основных преимуществ такой ЭМ является то, что ротор может быть выполнен с валом газовой микротурбины в виде одной детали. Это упрощает технологию изготовления и сборки энергетического комплекса.

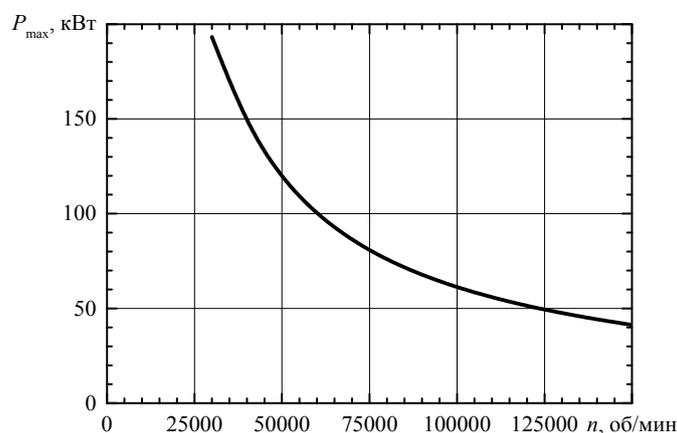


Рис. 2. Зависимость максимальной мощности ЭГ от частоты вращения ротора

При разработке высокооборотной асинхронной ЭМ с массивным ротором одним из наиболее сложных вопросов является снижение уровня потерь на статоре и роторе. Магнитопровод статора перемагничивается с частотой вращения магнитного поля, поэтому для уменьшения уровня магнитных потерь было принято сниженное значение индукции в воздушном зазоре. Потери в массивном роторе в значительной степени определяются наличием высших гармоник поля. Для снижения их уровня использовалась пятифазная обмотка статора. Также ее использование позволяет снизить токовую нагрузку на силовые полупроводниковые приборы активного выпрямителя и использовать модули.

## **2. Система управления высокооборотным электрогенератором для микро-ГТУ**

Способы и алгоритмы регулирования высокооборотного ЭГ во многом определяют эффективность его работы, поэтому одним из наиболее важных вопросов при создании высокооборотного ЭГ является разработка системы управления. Наилучших результатов с точки зрения качества переходных процессов и точности управления позволяют добиться системы, построенные на основе принципов векторного регулирования [3]. Для рассматриваемого высокооборотного асинхронного ЭГ была разработана двухканальная система автоматического регулирования со стабилизацией потокосцепления ротора, структурная схема которой приведена на рис. 3. Каналы стабилизации потокосцепления ротора и регулирования момента выполнены двухконтурными, с управлением по напряжению. Это позволяет использовать для управления активным выпрямителем широтно-импульсную модуляцию с контролем гармонического состава [3] и обеспечить приемлемую частоту переключения силовых полупроводниковых приборов при высоком качестве регулирования.

Выбор и отработка алгоритмов регулирования и первоначальная настройка системы управления должны проводиться уже на этапе разработки высокооборотного ЭГ, до изготовления экспериментального образца. Вследствие этого для проведения таких исследований и проектирования устройств с его использованием необходима разработка математической модели (ММ), описывающей процессы в нем в рабочих режимах. Одним из наиболее сложных вопросов является определение параметров ММ на этапе проектирования. Поэтому был рассмотрен вопрос создания ММ и методики определения параметров и выполнена их проверка по результатам экспериментальных исследований.

Рассматриваемый высокооборотный электрогенератор имеет массивный ротор. В асинхронной ЭМ такого типа особенно сильно проявляется эффект вытеснения тока в роторе. Традиционные методы расчета параметров ММ не могут быть использованы в этом случае. Необходимо создание методики определения параметров схемы замещения асинхронной ЭМ с массивным ротором.

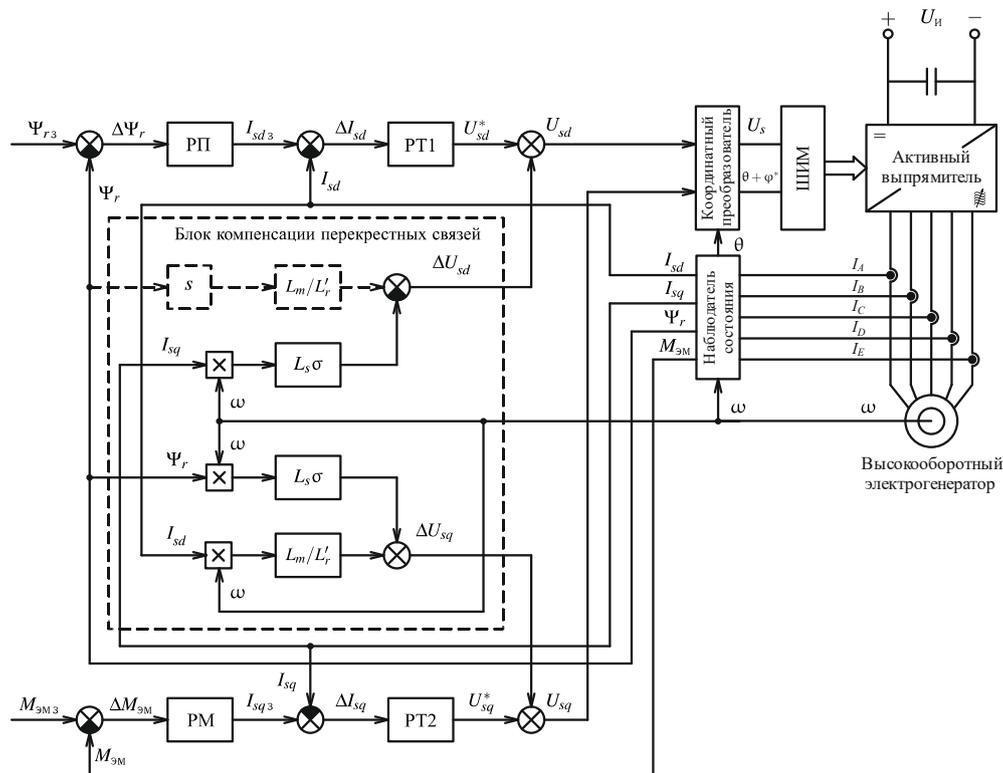


Рис. 3. Структурная схема системы автоматического регулирования высокооборотного ЭГ на базе асинхронной ЭМ с массивным ротором

Для определения параметров схемы замещения известен метод, основанный на использовании результатов серии расчетов магнитного поля при неподвижном роторе и питании обмоток переменным током разной частоты [4–8]. В оригинальном методе рассматривается машина с одним контуром на роторе и не учитывается наличие индуктивности рассеяния ротора.

Метод основан на том, что параметры схемы замещения асинхронной ЭМ определяются путем аппроксимации зависимости мнимой части индуктивности фазы статора от частоты токов статора, полученных в результате серии расчетов распределения магнитного поля при заторможенном роторе. Аппроксимация выполняется с использованием метода наименьших квадратов. Рассматриваемый метод показывает хорошие результаты для асинхронных ЭМ в традиционном исполнении, с короткозамкнутой клеткой на роторе или с двойной клеткой. Для определения структуры и параметров схемы замещения высокооборотного электрогенератора с массивным ротором необходима модификация рассматриваемого метода, учитывающая особенности решаемой задачи.

Для решения задачи определения параметров схемы замещения асинхронной ЭМ с массивным ротором предложено использовать метод, описанный в [9]. Этот метод является развитием подхода, изложенного в [10]. Метод заключается в следующем. Асинхронная ЭМ представляется в виде схемы замещения, имеющей  $n$

контуров на роторе. Она показана на рис. 4, на котором приняты следующие обозначения [2]:

$\vec{U}_s, \vec{I}_s$  — напряжение и ток статора;

$\vec{I}_m, \vec{I}_{r1}, \vec{I}_{r2}, \dots, \vec{I}_{rn}$  — ток контура намагничивания и токи контуров ротора;

$r_s, L_{\sigma s}$  — активное сопротивление и индуктивность рассеяния статора;

$L_m$  — индуктивность контура намагничивания;

$r'_{r1}, L'_{\sigma r1}; r'_{r2}, L'_{\sigma r2}; \dots; r'_{rn}, L'_{\sigma rn}$  — активные сопротивления и индуктивности рассеяния контуров ротора;

$s$  — относительное скольжение.

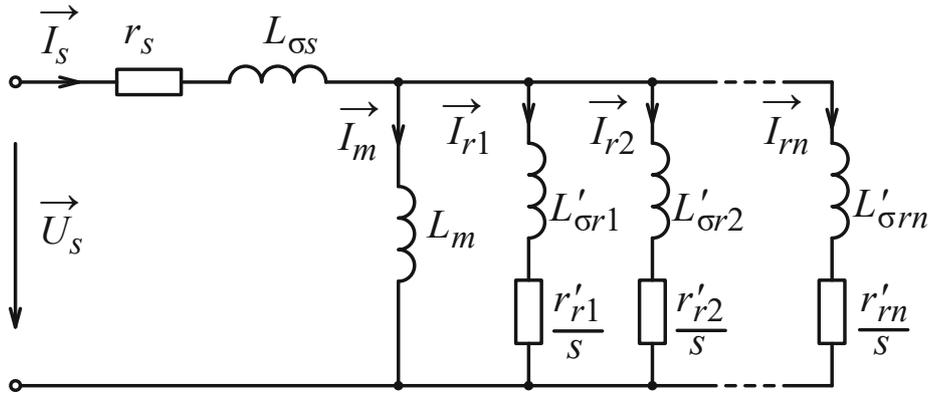


Рис. 4. Схема замещения асинхронной электрической машины с  $n$  контурами на роторе

При неподвижном роторе скольжение ротора равно единице. В этом случае комплексное сопротивление фазы асинхронной электрической машины равно:

$$Z_f(\omega) = r_s + j\omega L_f(\omega), \tag{1}$$

где  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота токов статора.

Индуктивность фазы в соответствии со схемой (рис. 3) равна:

$$L_f(\omega) = L_{\sigma s} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_m} + \frac{1}{j\omega L'_{\sigma r1} + r'_{r1}} + \frac{1}{j\omega L'_{\sigma r2} + r'_{r2}} + \dots + \frac{1}{j\omega L'_{\sigma rn} + r'_{rn}}} \cdot \frac{1}{j\omega}. \tag{2}$$

В качестве определяемых параметров выступают индуктивность контура намагничивания, активные сопротивления и индуктивности рассеяния контуров ротора. Аппроксимирующая функция, в соответствии с описанным выше подходом, является зависимостью мнимой части индуктивности фазы от частоты тока статора:

$$L_{fq}(\omega, f) = \text{Im}(L_f(\omega, b)), \tag{3}$$

где  $b = (L_m, L'_{\sigma r1}, r'_{r1}, L'_{\sigma r2}, r'_{r2}, \dots, L'_{\sigma rn}, r'_{rn})^T$  — вектор параметров аппроксимации, имеющий размерность  $2n + 1$ .

Индуктивность рассеяния статора определяется по вещественной части индуктивности фазы [6], полученной в результате серии расчетов распределения поля.

В процессе обработки полученных в ходе расчетов данных были рассмотрены три случая: с одним, двумя и тремя контурами на роторе. Параметры приведены на одну фазу. На рис. 5 показаны результаты аппроксимации действительной и мнимой частей индуктивности фазы высокооборотного электрогенератора при одном и трех контурах на роторе [11].

Анализ полученных зависимостей показывает, что использование модели асинхронной ЭМ с одним контуром на роторе не позволяет с достаточной точностью аппроксимировать зависимость индуктивности фазы рассматриваемого высокооборотного электрогенератора. Это происходит из-за сильного влияния эффекта вытеснения тока в массивном роторе. Увеличение количества контуров на роторе в модели асинхронной ЭМ значительно улучшает точность аппроксимации. Анализ полученных данных показал, что для адекватного представления электромагнитных процессов в исследуемой электрической машине во всем диапазоне скольжений достаточно использовать три контура.

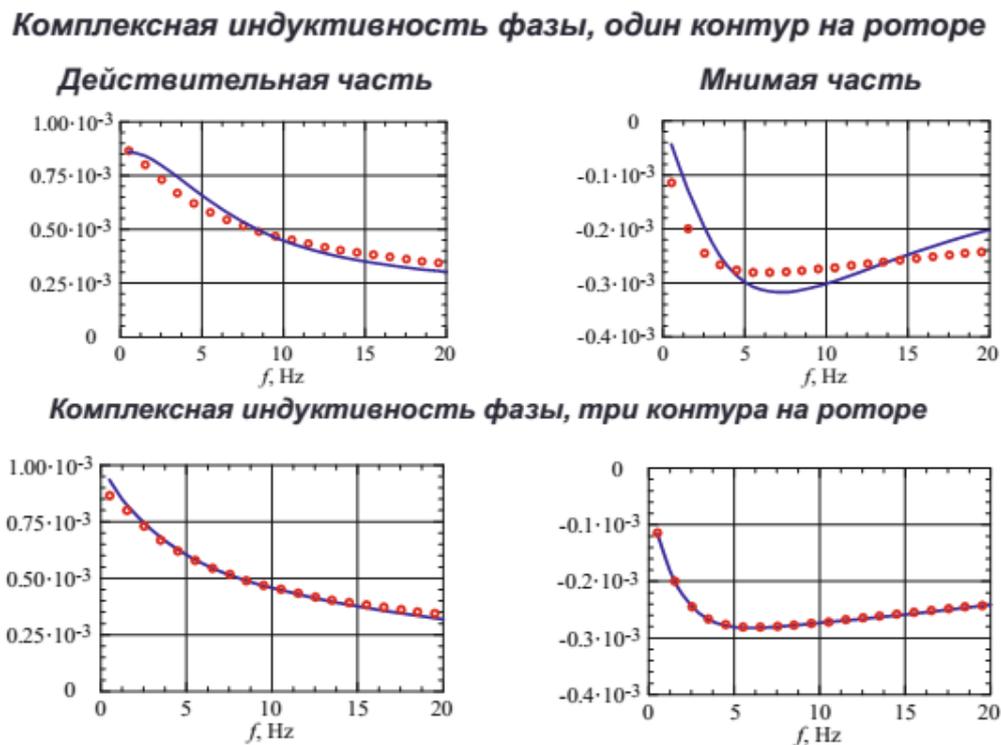


Рис. 5. Результаты аппроксимации вещественной и мнимой частей индуктивности фазы высокооборотного асинхронного ЭГ с массивным ротором при схеме замещения с одним и тремя контурами на роторе

### 3. Наблюдатель состояния высокооборотного асинхронного электрогенератора с массивным ротором

Особенностью конструкции рассматриваемой ЭМ, как было отмечено выше, является наличие массивного ротора в виде цилиндра из сплошного материала. На электромагнитные процессы в такой ЭМ значительное влияние оказывает вытеснение тока в массивном роторе. Поэтому традиционно используемые методы моделирования и управления асинхронной электрической машиной не могут быть использованы без изменений, учитывающих это явление.

Для успешной работы совместно с газовой турбиной регулирование ЭГ должно быть реализовано с высокими динамическими показателями во всем диапазоне скоростей. Эффективность системы автоматического регулирования, реализующей принципы векторного регулирования (см. рис. 3), во многом определяется точностью оценки величины и положения вектора потокосцепления ротора. Поэтому наблюдатель состояния асинхронной ЭМ является одним из наиболее важных элементов такой системы.

В процессе работы, под действием различных факторов, параметры асинхронной электрической машины изменяются. Для эффективной работы системы управления необходимо, чтобы наблюдатель состояния адаптировался к этим изменениям. Для ЭМ традиционной конструкции, с обмоткой типа «беличья клетка», изменение параметров происходит в основном из-за изменения активного сопротивления статора и ротора при нагреве обмоток. Такие изменения происходят относительно медленно по сравнению с электромагнитными процессами. Большинство известных типов наблюдателей состояния [12–14] имеют возможность адаптироваться к такому медленному изменению параметров регулируемой асинхронной электрической машины.

Параметры контура ротора (активное сопротивление и индуктивность рассеяния) асинхронной ЭМ с массивным ротором зависят от скольжения и значительно изменяются при насыщении магнитопровода, поэтому необходимо создание такого наблюдателя состояния асинхронной ЭМ с массивным ротором, который учитывал бы эту особенность.

Отличительной чертой работы наблюдателя состояния высокооборотного ЭГ, работающего совместно с газовой микротурбиной, является то, что частота вращения ротора изменяется с использованием датчика. Это необходимо для того, чтобы контролировать работу микротурбины вне зависимости от состояния электрогенератора и его системы управления. Поэтому информацию об угловой скорости вращения ротора электрогенератора нет необходимости определять с использованием наблюдателя состояния. Другой особенностью наблюдателя состояния высокооборотного ЭГ асинхронного типа является необходимость адаптации к быстро меняющимся параметрам цепи ротора — активного сопротивления и

индуктивности рассеяния. По различным оценкам, в рассматриваемом случае наилучшие результаты могут быть получены с использованием фильтра Калмана [15–18].

В качестве измеряемых величин в рассматриваемом наблюдателе состояния выступают напряжения и токи фаз высокооборотного ЭГ. По этим измеренным значениям наблюдатель состояния должен восстанавливать переменные, необходимые для работы векторной системы управления: проекции тока статора и потокосцепления ротора на оси системы координат, связанной со статором, электромагнитный момент.

С учетом указанных особенностей и требований к наблюдателю состояния высокооборотного ЭГ применение линейного фильтра Калмана невозможно, так как при необходимости адаптации к изменению параметров цепи ротора задача становится нелинейной и требуется применение расширенного фильтра Калмана.

Наблюдатель состояния на основе расширенного фильтра Калмана создается на основе динамического описания объекта управления. В рассматриваемом случае переменными состояния объекта являются проекции векторов потокосцепления статора и ротора на оси системы координат  $\alpha - \beta$ . В качестве управляющего воздействия выступают фазные напряжения, приложенные к обмотке статора, измеряемыми величинами являются фазные токи. Уравнения состояния имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}[\Psi] = (p\omega[D] - [R][L]^{-1})[\Psi] + [B][u_{f\text{mean}}] \\ [i_f] = [C] \cdot [\Psi] \end{cases}, \quad (4)$$

где  $[B]$  и  $[C]$  — матрицы управления и измерения;

$[u_{f\text{mean}}]$  — вектор фазных напряжений (управляющих воздействий).

Вектор переменных состояния дополняется двумя переменными — активным сопротивлением и индуктивностью рассеяния ротора (приведенными к статору).

Фильтр Калмана рассматривается в дискретной постановке. Работа фильтра на каждом шаге по времени состоит из двух этапов — прогноза и коррекции. Прогноз состояния системы на  $k + 1$  шаге осуществляется с использованием численного дифференцирования:

$$[\Psi]_{k+1}^* = f(t_k, [\Psi]_k) = [\Psi]_k + \Delta T \cdot \frac{d}{dt}[\Psi]_k, \quad (5)$$

где  $\Delta T$  — шаг дискретизации фильтра по времени.

На этапе прогноза также рассчитывается прогнозируемая матрица ковариации ошибок вектора состояния:

$$[P]_{k+1}^* = [F]_k [P]_k [F]_k^T + Q, \quad (6)$$

где  $[F]_k = \frac{\partial f(t_k, [\Psi]_k)}{\partial [\Psi]_k}$  — матрица эволюции системы для момента времени  $t_{k+1}$ ;

$[Q]$  — матрица ковариации процесса.

На этапе коррекции рассчитываются ковариационная матрица для вектора отклонения (вектора ошибки) и оптимальная по Калману матрица коэффициентов усиления, формирующаяся на основании ковариационных матриц имеющегося прогноза вектора состояния и полученных измерений:

$$\begin{aligned} [S]_k &= [C][P]_{k+1}^* [C]^T + [R], \\ [K]_k &= [P]_{k+1}^* [C]^T [S]_k^{-1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $[R]$  — матрица ковариации ошибок измерения.

Затем определяются вектор оценки состояния системы и его ковариационная матрица на шаге  $k + 1$ :

$$\begin{aligned} [\Psi]_{k+1} &= [\Psi]_{k+1}^* + [K]_{k+1} \left( [i_{f\ mean}] - [C][\Psi]_{k+1}^* \right), \\ [P]_{k+1} &= ([I] - [K]_{k+1} [C])[P]_{k+1}^*, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $[i_{f\ mean}]$  — вектор фазных токов (измеряемых величин).

Матрица ковариации процесса задается на основании априорной информации о структуре уравнений математической модели электромагнитных процессов и точности, с которой известны параметры высокооборотного генератора. Матрица ковариации ошибок измерений рассчитывается путем анализа тестовой выборки измерений токов фаз и периодически корректируется в процессе вычислений.

#### 4. Результаты моделирования процессов в системе силовой преобразователь — высокооборотная электрическая машина

Для оценки правильности изложенного подхода к созданию наблюдателя состояния на основе расширенного фильтра Калмана было выполнено моделирование его работы совместно с моделью высокооборотного асинхронного ЭГ с массивным ротором. Для этого была использована описанная выше модель асинхронной ЭМ с тремя контурами на роторе. Высокооборотный ЭГ работает совместно с полупроводниковым преобразователем электроэнергии, выполняющим функции

активного выпрямителя. Преобразователь является мостовым пятифазным автономным инвертором напряжения. В расчетах было принято, что используется одноимпульсная модуляция выходного напряжения преобразователя, напряжение в звене постоянного тока равно 600 В, ротор электрогенератора вращается с частотой 100 000 об/мин. Был рассмотрен случай перехода от режима холостого хода к режиму генерации. Для этого частота напряжения, приложенного к обмоткам электрогенератора, ступенчато изменялась от синхронной частоты на величину скольжения в номинальном режиме (12 Гц). Сигналы напряжения и тока фаз электрогенератора подавались с выхода модели электрической машины на вход наблюдателя состояния после суммирования с нормально распределенной помехой с дисперсией порядка 10 %, что соответствует показателям реально используемых систем измерения. Время дискретизации наблюдателя было принято 5 мкс. На рис. 6 показаны зависимости токов, напряжений и электромагнитного момента, потокосцепления ротора в укрупненном масштабе времени [19].

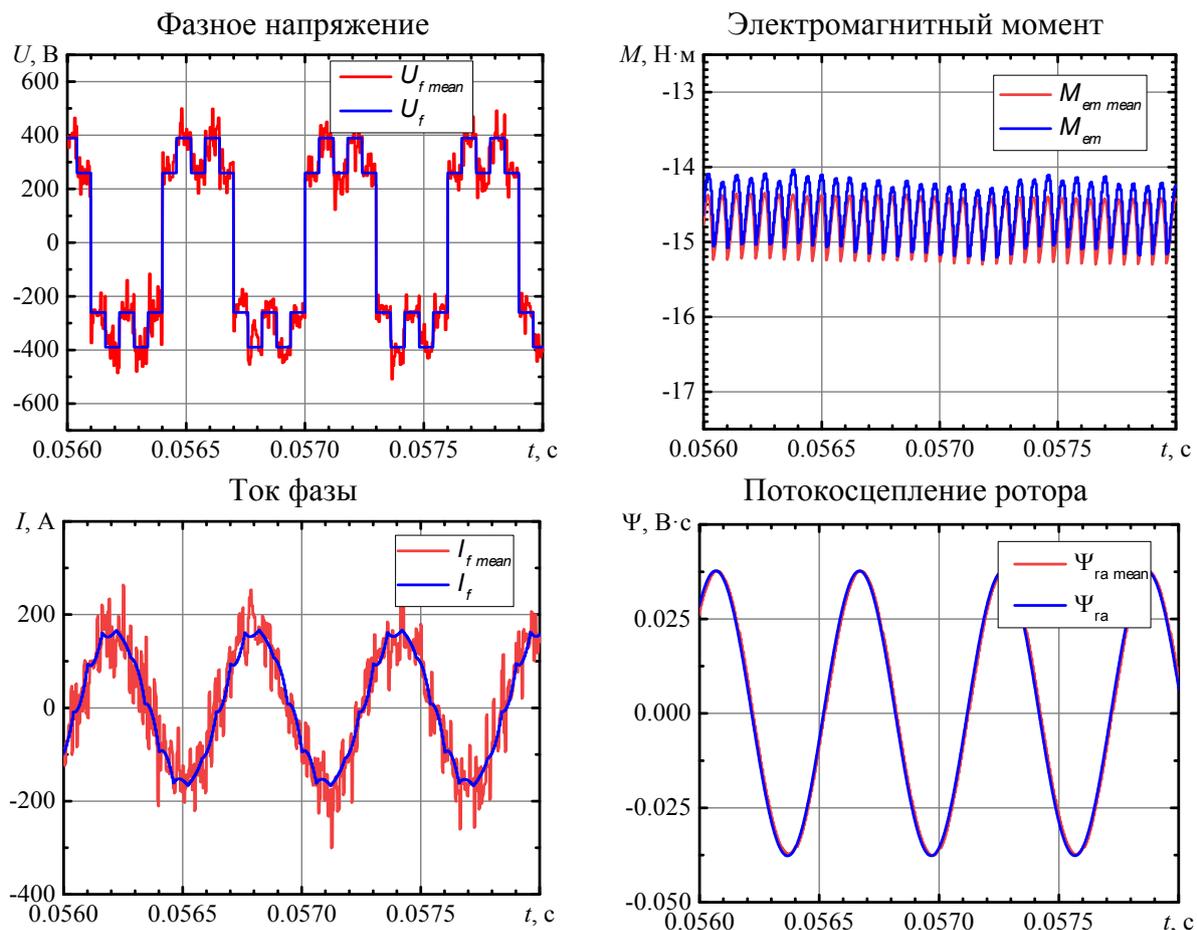


Рис. 6. Результаты моделирования процессов в системе высокооборотный электрогенератор — наблюдатель состояния на основе расширенного фильтра Калмана в укрупненном масштабе времени

Анализ полученных результатов показывает, что разработанный наблюдатель состояния обеспечивает хорошую фильтрацию измеряемых сигналов (фазных токов) и позволяет восстанавливать скрытые переменные, такие как поток сцепления ротора и электромагнитный момент с точностью, достаточной для нормальной работы системы автоматического регулирования. Принятый шаг дискретизации является допустимым с точки зрения устойчивости работы фильтра.

## 5. Устройство сопряжения с электрической сетью высокооборотного электрогенератора для микро-ГТУ

Для работы совместно с электрической сетью промышленной частоты (50 Гц) используется статический полупроводниковый преобразователь с возможностью синхронизации с сетью. Поскольку для газовой турбины недопустимы резкие изменения нагрузки со стороны ЭГ, в схеме преобразователя должно быть предусмотрено наличие реостатного тормоза. При внезапном пропадании нагрузки со стороны потребителей электроэнергии он позволяет избежать выхода из строя турбины. Поэтому для работы совместно с высокооборотным ЭГ целесообразно применение преобразователей со звеном постоянного напряжения. В этом случае на выходе ЭГ устанавливается активный выпрямитель, работающий на звено постоянного напряжения, общее с подключенным к электрической сети инвертором. Наличие звена постоянного тока упрощает реализацию реостатного тормоза. Кроме того, возможным становится подключение нескольких ЭГ к общему звену постоянного напряжения для повышения надежности электроснабжения и резервирования. Схема сетевого инвертора приведена на рис. 7.

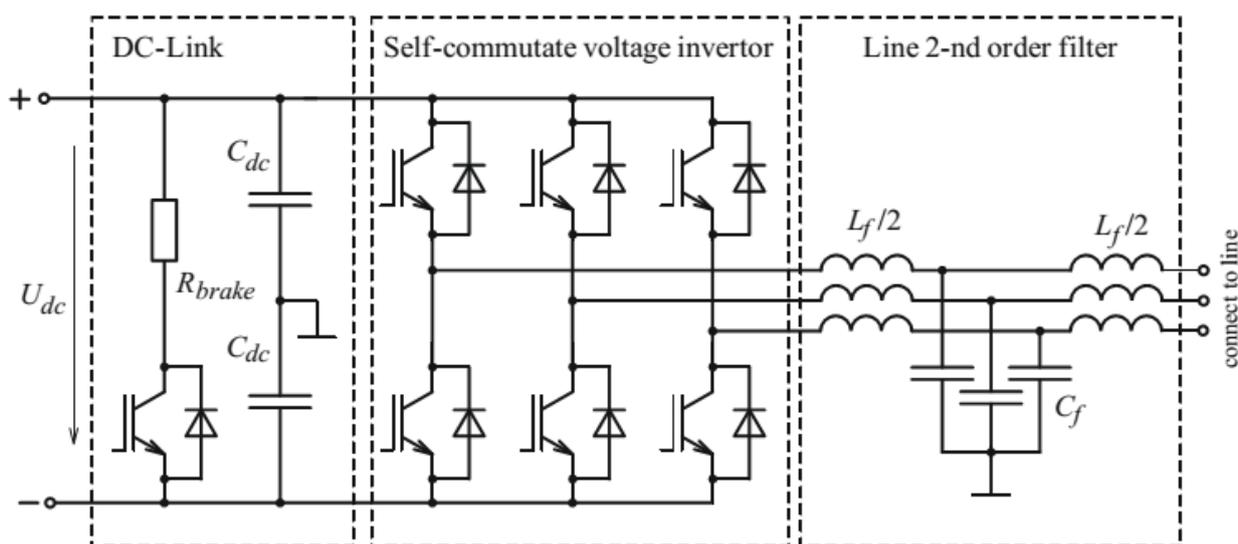


Рис. 7. Упрощенная принципиальная схема сетевого инвертора

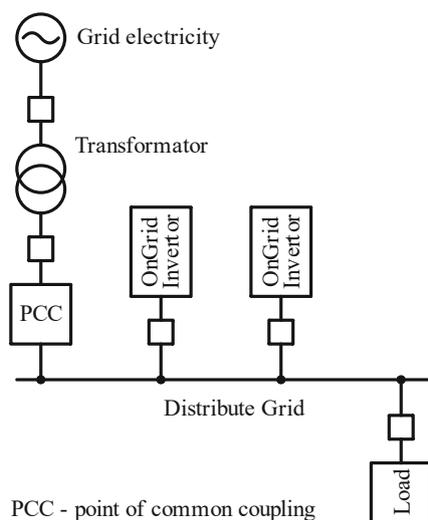


Рис. 8. Структурная схема системы электроснабжения

В системах энергоснабжения на основе микро-ГТУ, как правило, используется несколько параллельно работающих установок. Поэтому сетевые инверторы каждой из них должны допускать совместную работу на общую нагрузку в режиме автономного электроснабжения или работы совместно с электрической сетью.

Для снижения уровня высших гармоник на выходе инвертора расположен Т-образный фильтр. Формирование тока на выходе сетевого инвертора происходит на дросселе фильтра. На выходе инвертора устанавливается синус-фильтр второго порядка. С одной стороны на дроссель действует напряжение сети, с другой стороны — напряжение инвертора, который выступает в качестве управляемого источника напряжения.

В качестве иллюстрации применения инвертора, синхронизированного с сетью, была рассмотрена работа системы электроснабжения, состоящая из двух сетевых инверторов, нагрузки и распределительной сети, соединенной с внешней электрической сетью. На рис. 8 приведена структурная схема рассматриваемой системы электроснабжения. Трехфазная распределительная сеть переменного тока, с частотой 50 Гц и напряжением 380 В, подключена к электрической сети. К распределительной сети подключены два сетевых инвертора мощностью по 100 кВт и нагрузка мощностью 100 кВт.

Расчеты выполнены при следующих условиях. В начальный момент времени сетевые инверторы отключены от распределительной сети. Нагрузка получает питание от внешней сети. Сетевые инверторы подключаются к сети через 0,05 с. За это время система управления каждого из инверторов завершает процедуру синхронизации с напряжением сети в точках подключения, и они готовы к работе. В момент времени 0,04 с сетевые инверторы одновременно подключаются к сети. При этом первый инвертор генерирует ток с амплитудой 50 А, второй — 170 А. Сдвиг по фазе между напряжениями и токами в точках подключения инверторов

отсутствует (составляющая тока по оси  $q$  задается равной нулю). В таком режиме инверторы являются источниками только активной мощности, реактивная мощность не потребляется и не генерируется.

Для демонстрации возможности перераспределения нагрузки между сетевыми инверторами на интервале времени от 0,2 с до 0,3 с амплитуда тока первого инвертора увеличивается до 170 А, а второго — снижается до 50 А. На интервале времени от 0,35 с до 0,4 с задание тока по оси  $q$  второго сетевого инвертора изменяется от 0 А до -50 А. Данный режим соответствует генерации реактивной мощности.

На рис. 9, 10 показаны результаты расчетов. На рис. 9 приведены зависимости тока электрической сети, токов в точке подключения первого и второго сетевых инверторов и напряжения на нагрузке после в процессе подключения инверторов к сети. На рис. 10 показаны те же величины на всем расчетном интервале времени, а также активная и реактивная мощность электрической сети, первого и второго сетевых инверторов.

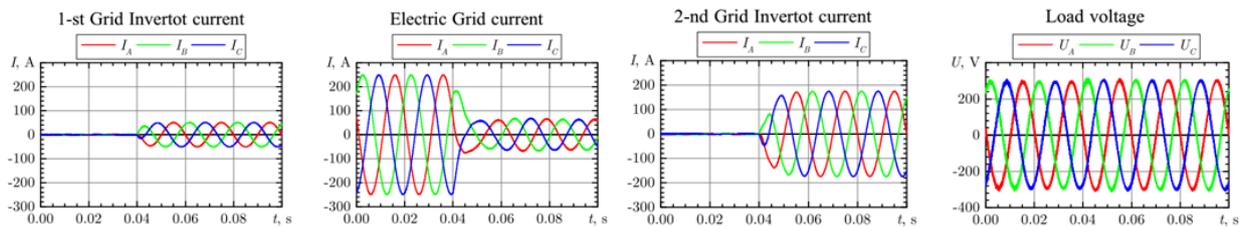


Рис. 9. Токи сети, первого и второго сетевых инверторов и напряжения на нагрузке в процессе подключения инверторов к сети

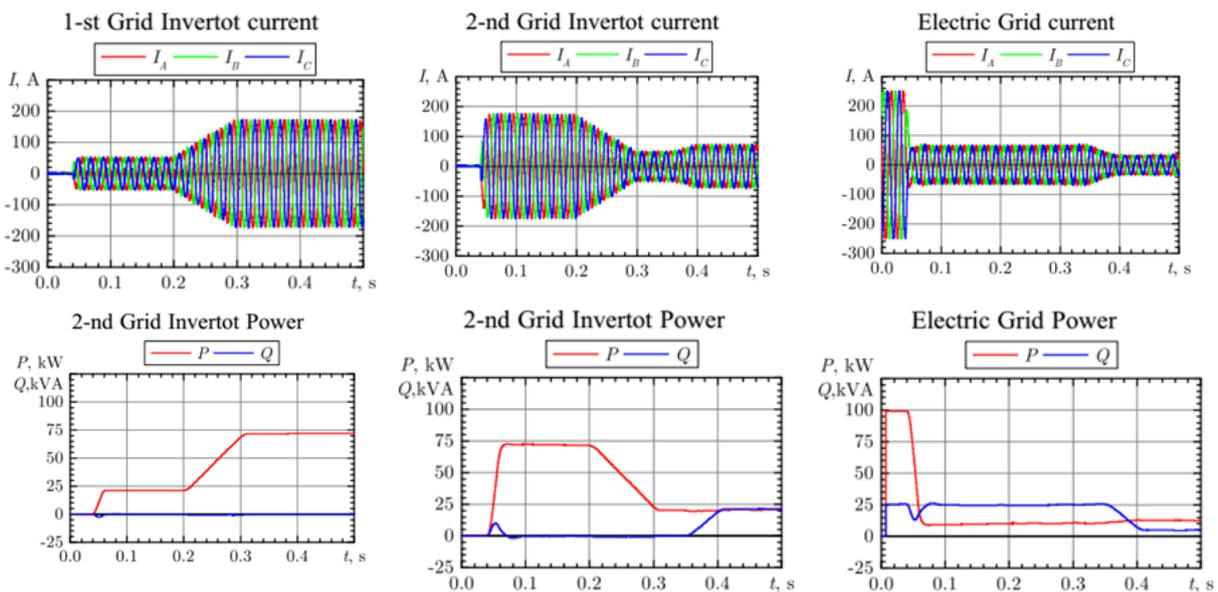


Рис. 10. Токи сети, активная и реактивная мощность сети, первого и второго сетевых инверторов

## Заключение. Основные выводы

Анализ результатов, полученных в ходе проведения исследовательских испытаний, показывает, что использованные при разработке высокооборотного электрогенератора для микро-ГТУ технические решения позволили создать работоспособную конструкцию. Были решены задачи создания конструкции электро-механического преобразователя, статического полупроводникового преобразователя, системы управления. Применение асинхронной ЭМ с массивным ротором в качестве электро-механического преобразователя высокооборотного ЭГ позволило преодолеть ограничение по мощности 60 кВт на частоте вращения 100 000 об/мин, возникающее при использовании высокооборотных синхронных ЭМ с ПМ на роторе из-за проблем с прочностью металлических бандажей.

Применение пятифазной обмотки статора в сочетании с магнитными клиньями и специальными видами модуляции выходного напряжения показало себя эффективным с точки зрения снижения потерь от высших временных и пространственных составляющих магнитного поля. Соотношение потерь в стали и в обмотке статора в разработанном высокооборотном ЭГ соответствует принятому в практике создания высокооборотных ЭМ.

## Библиографический список

1. Колпахчян П. Г. Об одной возможности изготовления роторов высокоскоростных электрогенераторов с постоянными магнитами / П. Г. Колпахчян, Б. Н. Лобов, И. В. Русакевич и др. // Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018: материалы докладов конференции, Новочеркасск, 03–06 октября 2018 года. — Новочеркасск: ООО «Лик», 2018. — С. 14–19.
2. Гольдберг О. Д. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / О. Д. Гольдберг. — М.: Высшая школа, 1984. — 431 с.
3. Kolpakhchyan P. Systems Approach to the Analysis of Electromechanical Processes in the Asynchronous Traction Drive of an Electric Locomotive / P. Kolpakhchyan, A. Zarifian, A. Andruschenko // Rail Transport — Systems Approach. — 2017. — Pp. 67–134.
4. Dolinar D. Calculation of two-axis induction motor model parameters using finite elements / D. Dolinar, R. De Weerd, R. Belmans et al. // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 1997. — Vol. 12. — Iss. 2. — Pp. 133–142.
5. Levi E. General method of magnetising flux saturation modelling in d-q axis models of double-cage induction machines / E. Levi // IEEE Proceedings on Electric Power Applications. — 1997. — Vol. 144. — Iss. 2. — Pp. 101–109.
6. Wilow V. Electromagnetical model of an induction motor in COMSOL Multiphysics: Master's thesis / V. Wilow // KTH, Electrical Energy Conversion. — 2014. — P. 50.

7. Nocedal J. Numerical Optimization / J. Nocedal, S. Wright // Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. — 2nd edition. — Springer-Verlag GmbH, 2006. — 664 p.
8. Kanzow C. Levenberg — Marquardt methods with strong local convergence properties for solving nonlinear equations with convex constraints / C. Kanzow, N. Yamashita, M. Fukushima // Journal of Computational and Applied Mathematics. — 2004. — Vol. 172. — Iss. 2. — Pp. 375–397.
9. McGuinness D. T. A performance comparison of different rotor types for high-speed induction motors / D. T. McGuinness, M. O. Gulbahce, D. A. Kocabas // 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). — 2015. — Pp. 584–589.
10. Williamson S. Calculation of cage induction motor equivalent circuit parameters using finite elements / S. Williamson, M. J. Robinson // IEEE Proceedings. Electric Power Applications. — 1991. — Vol. 138. — Iss. 5. — P. 264.
11. Колпахчян П. Г. Определение параметров схемы замещения асинхронной электрической машины с массивным ротором / П. Г. Колпахчян, М. С. Подберезная, Д. В. Ольховатов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2019. — Т. 62. — № 5. — С. 31–36. — DOI: 10.17213/0136-3360-2019-5-31-36.
12. Jouili M. Luenberger state observer for speed sensorless ISFOC induction motor drives / M. Jouili, K. Jarray, Ya. Koubaa et al. // Electric Power Systems Research. — 2012. — Vol. 89. — Pp. 139–147. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779612000648> (дата обращения: 27.12.2019).
13. Zhang Y. A comparative study of Luenberger observer, sliding mode observer and extended Kalman filter for sensorless vector control of induction motor drives / Y. Zhang, Z. Zhao, T. Lu et al. // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. — 2009. — Pp. 2466–2473.
14. Messaoudi M. MRAS and Luenberger Observer Based Sensorless Indirect Vector Control of Induction Motors / M. Messaoudi, S. Lassaad, B. Mouna et al. // Asian Journal of Information Technology. — 2008. — Vol. 7. — Pp. 232–239.
15. Tiwari V. Sensorless speed control of induction motor drive using extended Kalman filter observer / V. Tiwari, S. Das, A. Pal // 2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). — 2017. — Pp. 1–6.
16. Basheer O. Flux and Speed Estimation of Induction Motors using Extended Kalman Filter / O. Basheer, M. Obaid // International Journal of Computer Applications. — 2018. — Vol. 181. — Pp. 27–31.
17. Alonge F. Sensorless Control of Induction-Motor Drive Based on Robust Kalman Filter and Adaptive Speed Estimation / F. Alonge, F. D’Ippolito, A. Sferlazza // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2014. — Vol. 61. — Pp. 1444–1453.
18. Rumzi N. High performance direct torque control induction motor drive utilising TMS320C31 digital signal processor / N. Rumzi // Digital Signal Processing Solutions, 22.04.2000.
19. Kolpakhchyan P. G. High-Speed Induction Motor State Observer Based on an Extended Kalman Filter / P. G. Kolpakhchyan, A. E. Kochin, B. N. Lobov et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2020. — Vol. 1156. — Pp. 633–644. — DOI: 10.1007/978-3-030-50097-9\_65.

Дата поступления: 20.07.2023

Решение о публикации: 31.08.2023

### Контактная информация:

ПОДБЕРЕЗНАЯ Маргарита Сергеевна — ассистент; pumadj@yandex.ru

КОЛПАХЧЬЯН Павел Григорьевич — д-р техн. наук, доц.; kolpakhchyan@mail.ru

## An Energy Complex Based on a High-Speed Electric Machine

M. S. Podbereznyaya<sup>1</sup>, P. G. Kolpakhchyan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Podbereznyaya M. S., Kolpakhchyan P. G. An Energy Complex Based on a High-Speed Electric Machine. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 114-132. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-114-132

### Summary

**Purpose:** The purpose of this study is to develop the scientific basis for designing high-speed electric generators used in conjunction with gas micro-turbines. **Methods:** To solve the tasks set, the theories of electrical machines; the finite element method; automatic control theory; methods of mathematical analysis, mathematical and circuit modeling; numerical modeling on a PC using FEMM and Matlab Simulink software complexes have been used. The research has been carried out on experimental samples of a high-speed electric generator and confirmed by the results of tests as part of an energy complex based on a gas micro-turbine in 2019. **Results:** A complex of scientifically based technical solutions for the design of a high-speed electric generator with an energy complex control system based on a micro-gas turbine has been developed. As a result, a high-speed electric generator for a gas microturbine with a power of 100 kW and a rotation speed of 100,000 rpm has been developed and manufactured. When designing, an asynchronous type electric generator with a massive rotor has been selected. A feature of the developed design is the use of a five-phase stator winding. A control system of an experimental sample of a high-speed electric generator for micro-GTU has been developed. **Practical significance:** It lies in the development of methods and algorithms for designing high-speed generator equipment for micro-GTU. Recommendations have been developed for choosing the type and configuration of a high-speed electric generator for an electric complex based on a micro-gas turbine. A method is proposed for calculating the parameters of the substitution circuit of a high-speed electric generator, which allows us to determine the parameters of the substitution circuit according to the known configuration of the active layer at the design stage.

**Keywords:** High-speed electric generator, control system, asynchronous electric machine with a massive rotor, electromechanical processes, computer modeling.

### References

1. Kolpakhch'yan P. G., Lobov B. N., Rusakevich I. V. et al. *Ob odnoy vozmozhnosti izgotovleniya rotorov vysokoskorostnykh elektrogeneratorov s postoyannymi magnitami. Trudy X Mezhdunarodnoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2018: materialy dokladov konferentsii, Novocherkassk, 03–06 oktyabrya 2018 goda* [About one possibility of manufacturing rotors of high-speed electric generators with permanent magnets. Proceedings of the X International Conference on

Automated Electric Drive AEP 2018: materials of conference reports, Novocherkassk, October 03–06, 2018]. Novocherkassk: OOO “Lik” Publ., 2018, pp. 14–19. (In Russian)

2. Gol'dberg O. D. *Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnik dlya vuzov* [Design of electrical machines: a textbook for universities]. M.: Vysshaya shkola Publ., 1984, 431 p. (In Russian)

3. Kolpakhchyan P., Zarifian A., Andruschenko A. Systems Approach to the Analysis of Electromechanical Processes in the Asynchronous Traction Drive of an Electric Locomotive. Rail Transport — Systems Approach, 2017, pp. 67–134.

4. Dolinar D., De Weerd R., Belmans R. et al. Calculation of two-axis induction motor model parameters using finite elements. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, vol. 12, Iss. 2, pp. 133–142.

5. Levi E. General method of magnetising flux saturation modelling in d-q axis models of double-cage induction machines. IEEE Proceedings on Electric Power Applications, 1997, vol. 144, Iss. 2, pp. 101–109.

6. Wilow V. Electromagnetical model of an induction motor in COMSOL Multiphysics: Master's thesis. KTH, Electrical Energy Conversion, 2014, p. 50.

7. Nocedal J., Wright S. Numerical Optimization. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. 2nd edition. Springer-Verlag GmbH, 2006, 664 p.

8. Kanzow C., Yamashita N., Fukushima M. Levenberg — Marquardt methods with strong local convergence properties for solving nonlinear equations with convex constraints. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2004, vol. 172, Iss. 2, pp. 375–397.

9. McGuinness D. T., Gulbahce M. O., Kocabas D. A. A performance comparison of different rotor types for high-speed induction motors. 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2015, pp. 584–589.

10. Williamson S., Robinson M. J. Calculation of cage induction motor equivalent circuit parameters using finite elements. IEEE Proceedings. Electric Power Applications, 1991, vol. 138, Iss. 5, p. 264.

11. Kolpakhch'yan P. G., Podbereznaya M. S., Ol'khovtov D. V. Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnoy elektricheskoy mashiny s massivnym rotorom [Determination of the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous electric machine with a massive rotor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics]. 2019, vol. 62, Iss. 5, pp. 31–36. DOI: 10.17213/0136-3360-2019-5-31-36. (In Russian)

12. Jouili M., Jarray K., Koubaa Ya. et al. Luenberger state observer for speed sensorless ISFOC induction motor drives. Electric Power Systems Research, 2012, vol. 89, pp. 139–147. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779612000648> (accessed: December 27, 2019).

13. Zhang Y., Zhao Z., Lu T. et al. A comparative study of Luenberger observer, sliding mode observer and extended Kalman filter for sensorless vector control of induction motor drives. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009, pp. 2466–2473.

14. Messaoudi M., Lassaad S., Mouna B. et al. MRAS and Luenberger Observer Based Sensorless Indirect Vector Control of Induction Motors. Asian Journal of Information Technology, 2008, vol. 7, pp. 232–239.

15. Tiwari V., Das S., Pal A. Sensorless speed control of induction motor drive using extended Kalman filter observer. 2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2017, pp. 1–6.
16. Basheer O., Obaid M. Flux and Speed Estimation of Induction Motors using Extended Kalman Filter. *International Journal of Computer Applications*, 2018, vol. 181, pp. 27–31.
17. Alonge F., D’Ippolito F., Sferlazza A. Sensorless Control of Induction-Motor Drive Based on Robust Kalman Filter and Adaptive Speed Estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 61, pp. 1444–1453.
18. Rumzi N. High performance direct torque control induction motor drive utilising TMS320C31 digital signal processor. *Digital Signal Processing Solutions*, 22.04.2000.
19. Kolpakhchyan P. G., Kochin A. E., Lobov B. N. et al. High-Speed Induction Motor State Observer Based on an Extended Kalman Filter. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1156, pp. 633–644. DOI: 10.1007/978-3-030-50097-9\_65.

Received: July 20, 2023

Accepted: August 31, 2023

**Author’s information:**

Margarita S. PODBEREZNAYA — Assistant; pumadj@yandex.ru

Pavel G. KOLPAKHCHYAN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; kolpakhchyan@mail.ru

---

## ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 338.47

### **Использование коэффициентов эластичности спроса по цене для оценки платежеспособности грузов на железнодорожном транспорте с тарифными целями (на примере РФ в 2006–2023 гг.)**

**Ю. В. Егоров**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Егоров Ю. В.* Использование коэффициентов эластичности спроса по цене для оценки платежеспособности грузов на железнодорожном транспорте с тарифными целями (на примере РФ в 2006–2023 гг.) // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 133–146. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-133-146

#### **Аннотация**

**Цель:** Исследование возможности использования коэффициентов эластичности спроса по цене для оценки платежеспособности грузов на железнодорожном транспорте с тарифными целями (на примере РФ в 2006–2023 гг.). **Методы:** Применялись статистический метод, эконометрическое моделирование, анализ, синтез, системный подход, сравнительный метод. **Результаты:** Проведена оценка коэффициентов эластичности спроса по цене для грузов, перевозимых по инфраструктуре ОАО «РЖД» отдельно для инфраструктурно-локомотивной и вагонной составляющих железнодорожного тарифа. На основе анализа результатов данной оценки выявлены причины отклонений от гипотезы исследования и сформулированы перспективы и условия применения коэффициентов эластичности спроса по цене для оценки платежеспособности грузов на железнодорожном транспорте с тарифными целями в РФ. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут использоваться при разработке мероприятий тарифной политики на грузовом железнодорожном транспорте РФ, а также для дальнейших разработок в области методологии построения грузовых железнодорожных тарифов.

**Ключевые слова:** Платежеспособность грузов, коэффициенты эластичности спроса по цене, грузовые железнодорожные тарифы, инфраструктурно-локомотивная составляющая тарифа, вагонная составляющая тарифа.

Платежеспособность грузов на железнодорожном транспорте — это способность грузов оплатить железной дороге тариф за перевозку, способность грузов выдержать установленный тариф. Понимание платежеспособности грузов важно для установления грузовых железнодорожных тарифов. Первое определение платежеспособности грузов дал еще А. Смит в 1776 году. Позже, с появлением и развитием железнодорожного транспорта платежеспособность грузов на железнодо-

рожном транспорте исследовалась в трудах Ч. Эллета (1839), Д. Ларднера (1850), Д. Журавского (1864), О. Михаэлиса (1873), А. Чупрова (1875), С. Витте (1884), Д. Пихно (1888), К. Загорского (1901) и др.

Как оценить платежеспособность конкретного груза на железнодорожном транспорте? Еще в 1839 г. Ч. Эллетом было замечено, что относительно дорогие грузы (продукция конечного спроса и дорогие сырьевые грузы небольшой массы) могут выдержать высокий в абсолютном выражении тариф, однако доля транспортной составляющей в цене таких грузов невелика. Относительно дешевые грузы (дешевые сырьевые и строительные грузы большой массы), напротив, могут платить только невысокий в абсолютном выражении тариф, но транспортная составляющая в цене таких грузов большая. Так Эллет пришел к идее дифференциального ценообразования по платежеспособности грузов на основе тарифных классов: грузы разных тарифных классов должны платить разные в абсолютном выражении тарифы [1].

В 1927 г. Ф. Рэмси разработал подход к ценообразованию, который позже назвали ценообразованием по Рэмси и который применим к формированию цен естественных монополий в условиях сокращения государственного субсидирования. Согласно данному подходу цену на товар (услугу) следует устанавливать таким образом, чтобы превышение предельных затрат оказывалось обратно пропорциональным эластичности спроса для товара [2]. Для железнодорожного транспорта это означает, что с ростом эластичности спроса на перевозку конкретного груза повышается чувствительность грузоотправителей к изменению тарифа (поэтому тариф для таких грузоотправителей должен устанавливаться на уровне, близком к предельным затратам). При низкой эластичности спроса на перевозку конкретного груза, напротив, тариф может устанавливаться гораздо выше предельных затрат, так как в этом случае объем перевозок грузов снизится незначительно. При этом грузы с большой транспортной составляющей в конечной цене, как правило, демонстрируют высокую ценовую эластичность спроса на перевозки; напротив, для грузов с небольшой транспортной составляющей в конечной цене часто характерна низкая ценовая эластичность. То есть коэффициенты эластичности спроса на перевозки по цене можно использовать для оценки платежеспособности грузов на железнодорожном транспорте, прежде всего с целью установления и корректировки тарифов.

Оценке платежеспособности грузов с использованием коэффициентов ценовой эластичности спроса на железнодорожном транспорте с тарифными целями (т. е. исследованию применения ценообразования по Рэмси на практике) на примере Северной Америки посвящены работы А. Фридландера и Р. Спэди [3], Т. Оума [4], В. Абдельвахаба [5]. Среди отечественных исследователей можно выделить Д. Гордеева и Г. Идрисова [6], А. Синева [7]. Косвенно данную проблематику затрагивают в своих работах И. Гулый [8], Н. Журавлева [9], Е. Волкова [10].

Признавая вклад данных авторов в исследование этой проблематики, необходимо отметить некоторые их недостатки:

1) оценка платежеспособности грузов с использованием коэффициентов эластичности спроса по цене на примере российского железнодорожного транспорта проводится только Д. Гордеевым и Г. Идрисовым для ограниченного временного периода с 2012 по 2016 г.;

2) рассмотренные исследования не до конца раскрывают связь между платежеспособностью грузов и коэффициентами ценовой эластичности спроса на их перевозки железнодорожным транспортом.

Сказанное выше обуславливает актуальность данного исследования и позволяет сформулировать его цель: исследовать возможность использования коэффициентов эластичности спроса по цене для оценки платежеспособности грузов на железнодорожном транспорте с тарифными целями (на примере РФ в 2006–2023 гг.).

Гипотезу данного исследования сформулируем следующим образом:

1) рассчитанные коэффициенты эластичности спроса на грузовые железнодорожные перевозки в РФ по цене отрицательные (т. е. спрос на услугу по перевозке описывается классической нисходящей гиперболой/прямой спроса);

2) коэффициенты эластичности для перевозки грузов 1-го тарифного класса имеют максимальные по модулю значения (высокая эластичность спроса по цене), коэффициенты эластичности для перевозки грузов 2-го и (особенно) 3-го тарифного классов принимают меньшие (или минимальные) по модулю значения (низкая эластичность спроса по цене).

## Методология исследования

Для оценки коэффициентов эластичности по цене (инфраструктурно-локомотивная составляющая тарифа) перевезенных по инфраструктуре ОАО «РЖД» грузов по месяцам 2005–2023 гг. использовалась следующая формула:

$$E_{tr\_inf}^D = \frac{\frac{\Delta Q}{Q_0} \cdot 100\%}{Tempo\_tr\_inf \cdot 100\%}, \quad (1)$$

где  $Q_0$  — объем перевозки (погрузки) груза на инфраструктуре ОАО «РЖД» за месяц, предшествующий месяцу расчета коэффициента эластичности, тыс. тонн;  $\Delta Q$  — изменение объема перевозки (погрузки) груза на инфраструктуре ОАО «РЖД» на протяжении месяца расчета коэффициента эластичности по отношению к предыдущему месяцу, тыс. тонн;

$Tempo\_tr\_inf$  — темп изменения тарифов на грузовые железнодорожные перевозки в РФ (тарифы ОАО «РЖД») в месяц расчета коэффициента эластичности по отношению к предыдущему месяцу, доли.

Расчет коэффициентов по формуле (1) производился отдельно по каждому грузу/разделу грузов в ЕТСНГ (Единая тарифно-статистическая номенклатура грузов) согласно Прейскуранту № 10-01 по месяцам индексации тарифов ОАО «РЖД» согласно приказам по индексации ФСТ/ФАС России.

Средние коэффициенты эластичности по цене (инфраструктурно-локомотивная составляющая тарифа) перевезенных по инфраструктуре ОАО «РЖД» грузов в 2005–2023 гг. рассчитывались как средние арифметические коэффициентов, рассчитанных по формуле (1).

Для оценки коэффициентов эластичности по цене (вагонная составляющая тарифа) перевезенных по инфраструктуре ОАО «РЖД» каменного угля, нефти и нефтепродуктов в 2018–2022 гг. использовалась следующая формула:

$$E_{tr\_wag}^D = \frac{\frac{\Delta Q}{Q_0} \cdot 100\%}{Tempo\_wag\_St\_rent \cdot 100\%} = \frac{\frac{\Delta Q}{Q_0} \cdot 100\%}{\frac{\Delta St\_rent}{St\_rent_0} \cdot 100\%}, \quad (2)$$

где  $Q_0$  — объем перевозки (погрузки) каменного угля/нефти и нефтепродуктов на инфраструктуре ОАО «РЖД» за месяц, предшествующий месяцу расчета коэффициента эластичности, тыс. тонн;

$\Delta Q$  — изменение объема перевозки (погрузки) каменного угля/нефти и нефтепродуктов на инфраструктуре ОАО «РЖД» на протяжении месяца расчета коэффициента эластичности по отношению к предыдущему месяцу, тыс. тонн;

$St\_rent_0$  — средняя ставка аренды на полувагоны (для каменного угля)/вагоны-цистерны для нефтепродуктов (для нефти и нефтепродуктов) за месяц, предшествующий месяцу расчета коэффициента эластичности, руб. за вагон в сутки;

$\Delta St\_rent$  — изменение средней ставки аренды на полувагоны (для каменного угля)/вагоны-цистерны для нефтепродуктов (для нефти и нефтепродуктов) на протяжении месяца расчета коэффициента эластичности по отношению к предыдущему месяцу, руб. за вагон в сутки.

Расчет коэффициентов по формуле (2) производился отдельно для каменного угля/нефти и нефтепродуктов по месяцам изменения средней ставки аренды на полувагоны/вагоны-цистерны для нефтепродуктов на рынке операторских услуг.

Средние коэффициенты эластичности по цене (вагонная составляющая) перевезенных по инфраструктуре ОАО «РЖД» каменного угля, нефти и нефтепродуктов в 2018–2022 гг. рассчитывались как средние арифметические коэффициентов, рассчитанных по формуле (2).

Для расчета средних коэффициентов эластичности (вагонная составляющая тарифа) согласно результатам оценки моделей парной линейной регрессии объема

погрузки грузов на среднюю ставку аренды вагонов использовались стандартные модели парной линейной регрессии, временные ряды ставок аренды полувагонов/ вагонов-цистерн для периода 2018–2022 гг. (месячные данные, экзогенные переменные), временные ряды перевозки (погрузки) на инфраструктуре ОАО «РЖД» каменного угля, нефти и нефтепродуктов для периода 2018–2022 г. (месячные данные, эндогенные переменные). Расчет данных коэффициентов производился по формуле:

$$E_{tr\_wag\_reg}^D = b \cdot \frac{x_{t\_av}}{y_{t\_av}}, \quad (3)$$

где  $b$  — оценки моделей парной линейной регрессии для каменного угля, нефти и нефтепродуктов соответственно;

$x_{t\_av}$  — среднее значение экзогенной переменной;

$y_{t\_av}$  — среднее значение эндогенной переменной.

Также в исследовании применялись общенаучные методы: анализ, синтез, системный подход, сравнительный метод.

## Результаты исследования

С целью исследования возможности использования коэффициентов эластичности спроса по цене для оценки платежеспособности грузов на железнодорожном транспорте в работе был произведен расчет коэффициентов эластичности по цене (инфраструктурно-локомотивная составляющая тарифа) перевезенных по инфраструктуре ОАО «РЖД» грузов в 2005–2023 гг. Значения данных коэффициентов графически представлены на рис. 1 (рис. 1 для наглядности построен без значений коэффициентов за апрель 2008 г. и январь 2018 г., так как эти значения являются выпадающими значениями для временных рядов коэффициентов).

По представленным на рис. 1 коэффициентам эластичности были рассчитаны средние коэффициенты эластичности по цене, представленные в табл. 1. Также в табл. 1 для каждого груза/раздела грузов в ЕТСНГ согласно Прейскуранту № 10-01 был определен тарифный класс/преобладающий тарифный класс.

Аналогично рис. 1 на рис. 2 графически представлены рассчитанные в работе коэффициенты эластичности по цене (вагонная составляющая тарифа) перевезенных по инфраструктуре ОАО «РЖД» каменного угля, нефти и нефтепродуктов в 2018–2022 гг.

Аналогично табл. 1 по представленным на рис. 2 коэффициентам эластичности были рассчитаны средние коэффициенты эластичности по цене, представленные в табл. 2 (как среднее арифметическое коэффициентов эластичности по месяцам изменения средней ставки аренды вагонов, столбец 2 табл. 2). Кроме того, в

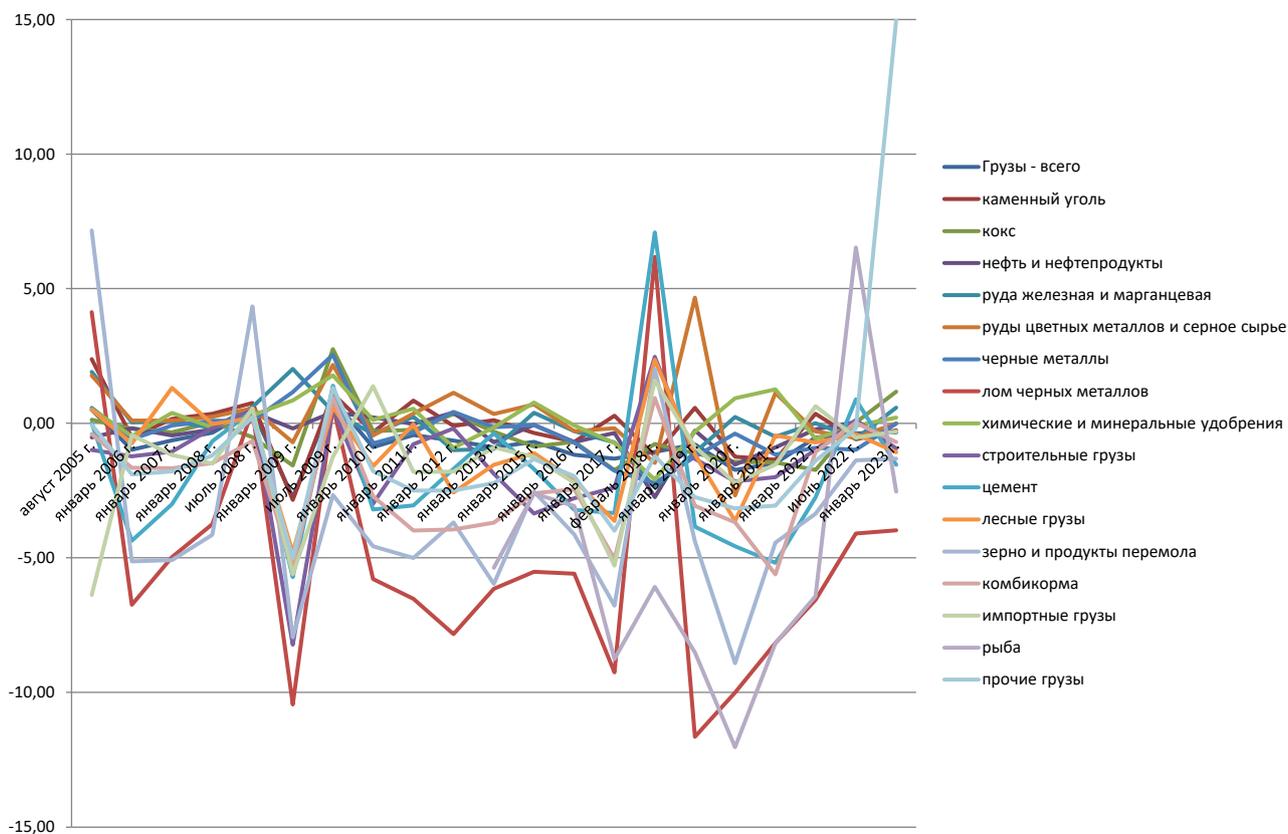


Рис. 1. Коэффициенты эластичности по цене (инфраструктурно-локомотивная составляющая тарифа) перевезенных по инфраструктуре ОАО «РЖД» грузов в 2005–2023 гг. (оценка автора на основе данных источников [11, 12])

столбце 3 табл. 2 представлены средние коэффициенты эластичности, рассчитанные по результатам оценки моделей парной линейной регрессии объема погрузки грузов на среднюю ставку аренды вагонов. Также в табл. 2 для каждого груза/раздела грузов в ЕТСНГ согласно Прейскуранту № 10-01 был определен тарифный класс/преобладающий тарифный класс.

### Обсуждение результатов

Как следует из полученных результатов, пункт 1) гипотезы данного исследования в основном подтверждается расчетами для случая инфраструктурно-локомотивной составляющей тарифа: большинство коэффициентов эластичности принимают отрицательные значения (рис. 1) на протяжении 2005–2023 гг. (рис. 1), для всех грузов/разделов грузов ЕТСНГ средние коэффициенты эластичности отрицательные (за исключением двух последних позиций, табл. 1). Однако пункт 2) гипотезы не подтверждается результатами оценки: коэффициенты эластичности только для двух грузов/разделов грузов ЕТСНГ первого тарифного класса (цемент и лесные грузы) превышают по модулю средний коэффициент эластичности по всем грузам ( $-0,970$ ),

ТАБЛИЦА 1. Средние коэффициенты эластичности по цене (инфраструктурно-локомотивная составляющая тарифа) перевезенных по инфраструктуре ОАО «РЖД» грузов в 2005–2023 гг.

Грузы/разделы грузов в ЕТСНГ согласно Прейскуранту № 10-01	Средний коэффициент эластичности с августа 2005 г. по январь 2023 г. (по месяцам индексации тарифов ОАО «РЖД» согласно приказам по индексации ФСТ/ФАС России)	Тарифный класс груза/ преобладающий тарифный класс для раздела грузов в ЕТСНГ согласно Прейскуранту № 10-01
Рыба	–6,006	2
Лом черных металлов	–4,146	3
Зерно и продукты перемола	–3,062	2
Комбикорма	–2,200	2
Лесные грузы	–1,391	1
Цемент	–1,352	1
Строительные грузы	–1,344	3
Прочие грузы	–1,119	—
Грузы — всего	–0,970	—
Нефть и нефтепродукты	–0,879	2
Каменный уголь	–0,771	1
Черные металлы	–0,748	3
Импортные грузы	–0,649	—
Руда железная и марганцевая	–0,295	1
Кокс	–0,180	1
Химические и минеральные удобрения	0,077	2
Руды цветных металлов и серное сырье	0,114	1

Источник: оценка автора на основе данных источников [11–13].

остальные пять коэффициентов эластичности со значениями по модулю выше среднего рассчитаны для грузов второго и третьего тарифных классов. При этом четыре коэффициента из семи со значениями по модулю ниже среднего рассчитаны для грузов первого тарифного класса.

Для случая вагонной составляющей пункт 1) гипотезы подтверждается только для случая нефти и нефтепродуктов, но не подтверждается для каменного угля (рис. 2, табл. 2). Пункт 2) гипотезы не подтверждается ни для каменного угля, ни для нефти и нефтепродуктов (средние коэффициенты эластичности, рассчитанные по формулам (2) и (3), дают значения  $-0,147$  и  $-0,082$  соответственно, что говорит о достаточно низкой ценовой эластичности).

Каковы причины отклонений результатов оценки от гипотезы исследования? На наш взгляд, данные отклонения обусловлены следующим:

ТАБЛИЦА 2. Средние коэффициенты эластичности по цене (вагонная составляющая) перевезенных по инфраструктуре ОАО «РЖД» каменного угля, нефти и нефтепродуктов в 2018–2022 гг.

Грузы/разделы грузов в ЕТСНГ согласно Прейскуранту № 10-01	Средний коэффициент эластичности с января 2018 г. по декабрь 2022 г. (как среднее арифметическое коэффициентов эластичности по месяцам изменения средней ставки аренды вагонов)	Средний коэффициент эластичности с января 2018 г. по декабрь 2022 г. (расчет по результатам оценки модели парной линейной регрессии, месячные данные)	Тарифный класс груза/ преобладающий тарифный класс для раздела грузов в ЕТСНГ согласно Прейскуранту № 10-01
Каменный уголь (подвижной состав — полувагоны)	0,721	Не рассчитывался (модель регрессии и его коэффициенты статистически незначимы)	1
Нефть и нефтепродукты (подвижной состав — цистерны для нефтепродуктов)	-0,147	-0,082	2

Источник: оценка автора на основе данных источников [12–15].

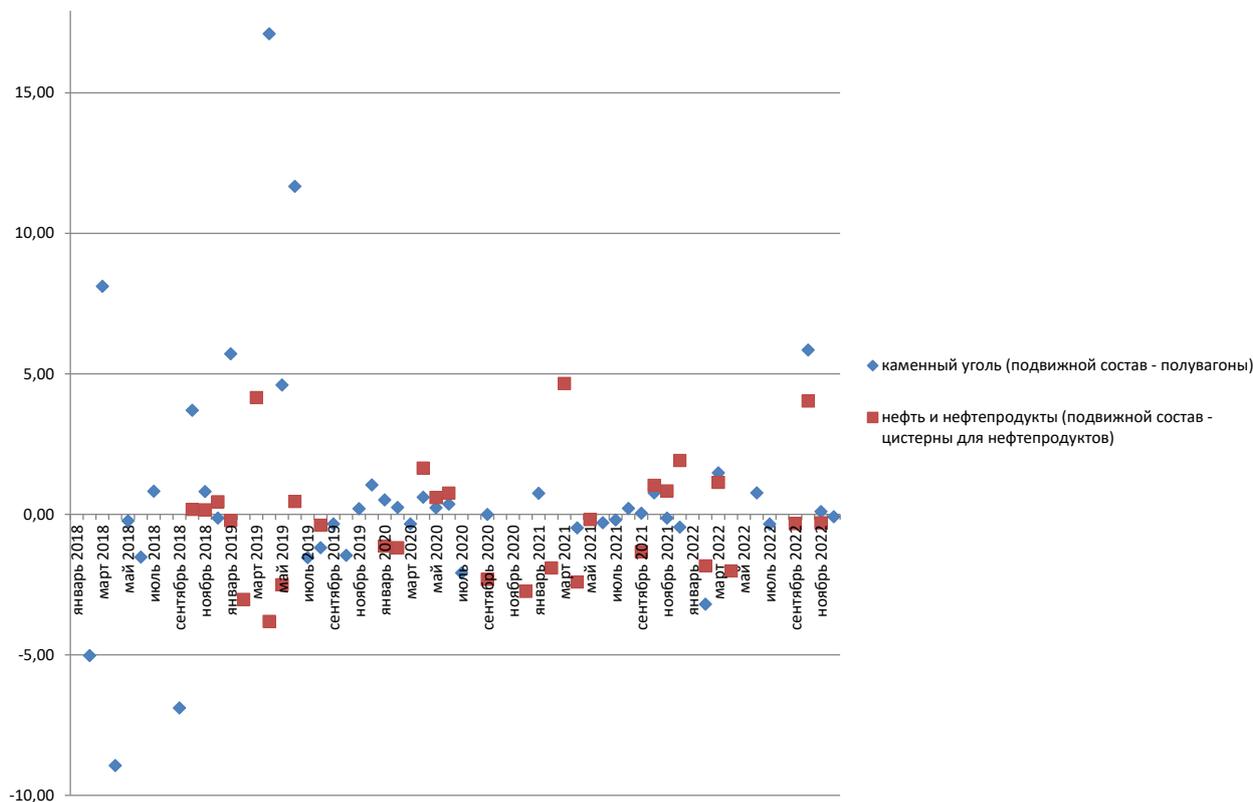


Рис. 2. Коэффициенты эластичности по цене (вагонная составляющая тарифа) перевезенных по инфраструктуре ОАО «РЖД» каменного угля, нефти и нефтепродуктов в 2018–2022 гг. (оценка автора на основе данных источников [12, 14, 15])

1. Для ряда грузов (каменный уголь, зерно и т. д.) в Прейскуранте № 10-01 предусмотрены дополнительные понижающие (или, реже, повышающие) тарифные коэффициенты. Также ОАО «РЖД» для стимулирования спроса на свои услуги использует ценовые пределы (повышение или понижение тарифов в рамках тарифного) дифференцированно по грузам и грузоотправителям. Однако ни данные коэффициенты, ни ценовые пределы по отдельным грузам не находят своего отражения в агрегированном показателе темпов изменения тарифов на грузовые перевозки в РФ, который рассчитывается Росстатом в основном на основе приказов по индексации ФАС/ФСТ России.

2. В методах, использованных в данном исследовании, расчет коэффициентов эластичности производится по всей совокупности перевезенного за период конкретного груза, т. е. не учитываются конкретные маршруты перевозки грузов.

3. На спрос на услуги по перевозке кроме ценовых действуют еще и неценовые факторы, влияние последних на спрос может оказаться сильнее (если, к примеру, у грузоотправителя нет альтернативы перевозке по железной дороге). Эти факторы могут не иметь прямого отношения к железнодорожному транспорту. Также возможно действие ценовых факторов, не имеющих прямого отношения к железной дороге (к примеру, изменение тарифов на перевозку конкурирующими видами транспорта). Отметим, что для коэффициента эластичности спроса на перевозку нефти и нефтепродуктов  $-0,082$  (вагонная составляющая, расчет с использованием уравнения регрессии, столбец 3 табл. 2) полученное уравнение регрессии и оценки его коэффициентов статистически значимы; однако коэффициент детерминации данного уравнения равен  $0,07$ , что говорит о наличии большого количества значимых факторов спроса, не включенных в модель регрессии.

4. Присутствие в Прейскуранте № 10-01 искажений (связанных с разнесением грузов по трем тарифным классам, с непропорциональными отличиями тарифных ставок между различными классами и другими причинами), что давно подчеркивается многими исследователями.

5. Небольшая транспортная составляющая в цене груза (грузы 3-го тарифного класса) не всегда однозначно свидетельствует о низкой ценовой эластичности спроса на перевозку; аналогично большая транспортная составляющая в цене груза (грузы 1-го тарифного класса) не всегда говорит о высокой ценовой эластичности спроса; т. е. зависимость между ценовой эластичностью спроса на перевозку груза и размером транспортной составляющей в конечной цене груза не всегда сильная.

Возможно ли применение коэффициентов эластичности спроса по цене для оценки платежеспособности грузов на железнодорожном транспорте РФ, основываясь на результатах данного исследования? На наш взгляд, возможно, но с учетом следующих условий:

1. Расчет коэффициентов эластичности спроса груза для конкретных маршрутов дает оценку платежеспособности данного груза в конкретных условиях, что важнее для практических решений по установлению/изменению конкретных тарифов на конкретных направлениях для конкретных грузоотправителей, нежели коэффициенты эластичности по всему объему перевозки данного груза по сети ОАО «РЖД». Отметим, что это учтено в методике расчета коэффициентов эластичности с тарифными целями, предложенной А. Синевым [7].

2. При расчете коэффициентов эластичности груза необходимо включение в расчет изменения тарифов всех дополнительных коэффициентов Прейскуранта № 10-01 и учет ценовых пределов.

3. Использование Прейскуранта № 10-01 для целей расчета коэффициентов эластичности в краткосрочной перспективе должно производиться с учетом искажений, присутствующих в данном нормативном документе (для инфраструктурно-локомотивной составляющей тарифа). В среднесрочной перспективе необходима корректировка этих искажений.

4. При расчете коэффициентов эластичности, а также при изменении тарифов на их основе необходим учет неценовых факторов спроса на перевозки конкретных грузов конкретными грузополучателями по конкретным направлениям. Отметим, что частично это учтено в оценке коэффициентов эластичности, проведенной Д. Гордеевым и Г. Идрисовым для ограниченных временных рядов [6].

## **Заключение**

В данной работе была исследована возможность использования коэффициентов эластичности спроса по цене для оценки платежеспособности грузов на железнодорожном транспорте с тарифными целями (на примере РФ в 2006–2023 гг.). Была произведена оценка коэффициентов эластичности спроса для грузов, перевозимых по инфраструктуре ОАО «РЖД» отдельно для инфраструктурно-локомотивной и вагонной составляющих железнодорожного тарифа. На основе анализа результатов данной оценки были выявлены причины отклонений от гипотезы исследования и сформулированы перспективы и условия применения коэффициентов эластичности спроса по цене для оценки платежеспособности грузов на железнодорожном транспорте с тарифными целями в РФ.

Полученные результаты могут использоваться при разработке мероприятий тарифной политики на грузовом железнодорожном транспорте РФ, а также для дальнейших разработок в области методологии построения грузовых железнодорожных тарифов.

## Библиографический список

1. Ellet C. An essay on the laws of trade in reference to the works of internal improvement in the United States. Richmond, P. D. Bernard, 1839. — 284 p.
2. Ramsey F. P. A Contribution to the Theory of Taxation / F. P. Ramsey // *The Economic Journal*. — 1927. — Vol. 37. — Iss. 145. — Pp. 47–61.
3. Friedlaender A. A Derived Demand Function for Freight Transportation / A. Friedlaender, R. Spady // *Review of Economics and Statistics*. — 1980. — Vol. 62. — Iss. 3. — Pp. 432–441.
4. Oum T. H. A Cross Sectional Study of Freight Transport Demand and Rail-Truck Competition in Canada / T. H. Oum // *Bell Journal of Economics*. — 1979. — Vol. 10. — Iss. 2. — Pp. 463–482.
5. Abdelwahab W. Elasticities of Mode Choice Probabilities and Market Elasticities of Demand: Evidence from a Simultaneous Mode Choice/Shipment-Size Freight Transport Model / W. Abdelwahab // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. — 1998. — Vol. 34. — Iss. 4. — Pp. 257–266.
6. Гордеев Д. С. Перспективы формирования новой тарифной системы грузовых железнодорожных перевозок / Д. С. Гордеев, Г. И. Идрисов // *Экономическая политика* — 2019. — Т. 14. — № 4. — С. 194–219.  
Новый Прейскурант № 10-01 или новая система государственного регулирования (О необходимости системного подхода в решении отраслевых проблем)? / А. Н. Синев // *Бюллетень транспортной информации*. — 2018. — № 1(271). — С. 4–11.
8. Гулый И. М. Влияние цифровой трансформации на структуру себестоимости транспортных услуг / И. М. Гулый // *Транспорт Российской Федерации*. — 2021. — № 4(95). — С. 16–18.
9. Журавлева Н. А. Влияние постпандемийной экономики на бизнес-модель транспортных организаций / Н. А. Журавлева // *Транспорт Российской Федерации*. — 2020. — № 3-4(88-89). — С. 20–23.
10. Волкова Е. М. Влияние логистических затрат на финансовые показатели работы компании / Е. М. Волкова, А. В. Стримовская // *Логистика и управление цепями поставок* — 2018. — № 5(88). — С. 53–61.
11. Индексы тарифов на грузовые перевозки. Данные Росстата. — URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31076> (дата обращения: 15.08.2023).
12. Объем погрузки основных видов грузов на железнодорожном транспорте (с 2005 г.). Данные Росстата. — URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31076> (дата обращения: 15.08.2023).
13. Постановление ФЭК РФ (Федеральной энергетической комиссии РФ) от 17 июня 2003 г. № 47-т/5 «Об утверждении Прейскуранта № 10-01 «Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами» (Тарифное руководство № 1, части 1 и 2)» (с изменениями и дополнениями). — URL: <https://base.garant.ru/12131790/> (дата обращения: 15.08.2023).

14. Обзор работы грузового железнодорожного транспорта за 12 месяцев 2022 г. Аналитика Союза операторов железнодорожного транспорта. — URL: <http://www.railsovet.ru/analytics/obzor/> (дата обращения: 15.08.2023).

15. Обзор работы грузового железнодорожного транспорта. Итоги 2019 года. Аналитика Союза операторов железнодорожного транспорта. — URL: <http://www.railsovet.ru/analytics/obzor/> (дата обращения: 15.08.2023).

Дата поступления: 29.07.2023

Решение о публикации: 28.08.2023

#### Контактная информация:

ЕГОРОВ Юрий Владимирович — канд. экон. наук, доц.; [orion56@mail.ru](mailto:orion56@mail.ru)

## The Use of Price Elasticity Coefficients of Demand to Assess the Solvency of Freight in Railway Transport for Tariff Purposes (on the Example of the Russian Federation in 2006–2023)

Yu. V. Egorov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Egorov Yu. V. The Use of Price Elasticity Coefficients of Demand to Assess the Solvency of Freight in Railway Transport for Tariff Purposes (on the Example of the Russian Federation in 2006–2023). *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 133–146. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-133-146

### Summary

**Purpose:** To study the possibility of using price elasticity coefficients of demand to assess the solvency of freight in railway transport for tariff purposes (on the example of the Russian Federation in 2006–2023).

**Methods:** Statistical method, econometric modeling, analysis, synthesis, systematic approach, comparative method have been used. **Results:** The coefficients of price elasticity of demand have been estimated for freight transported through the infrastructure of Russian Railways, separately for the infrastructure-locomotive and wagon components of the railway tariff. Based on the analysis of the results of this assessment, the reasons for deviations from the research hypothesis have been identified and the prospects and conditions for the use of price elasticity coefficients for assessing the solvency of freight in railway transport with tariff goals in the Russian Federation have been formulated. **Practical significance:** The results obtained can be used in the development of tariff policy measures for the freight railway transport of the Russian Federation, as well as for further developments in the field of methodology for constructing freight railway tariffs.

**Keywords:** Solvency of goods, coefficients of price elasticity of demand, freight railway tariffs, infrastructure-locomotive component of the tariff, wagon component of the tariff.

### References

1. Ellet C. An essay on the laws of trade in reference to the works of internal improvement in the United States. Richmond, P. D. Bernard, 1839. 284 p.

2. Ramsey F. P. A Contribution to the Theory of Taxation. *The Economic Journal*, 1927, vol. 37, Iss. 145, pp. 47–61.
3. Friedlaender A., Spady R. A Derived Demand Function for Freight Transportation. *Review of Economics and Statistics*, 1980, vol. 62, Iss. 3, pp. 432–441.
4. Oum T. H. A Cross Sectional Study of Freight Transport Demand and Rail-Truck Competition in Canada. *Bell Journal of Economics*, 1979, vol. 10, Iss. 2, pp. 463–482.
5. Abdelwahab W. Elasticities of Mode Choice Probabilities and Market Elasticities of Demand: Evidence from a Simultaneous Mode Choice/Shipment-Size Freight Transport Model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 1998, vol. 34, Iss. 4, pp. 257–266.
6. Gordeev D. S., Idrisov G. I. Perspektivy formirovaniya novoy tarifnoy sistemy gruzovykh zhelezнодорожных перевозок [Prospects for the formation of a new tariff system for freight rail transportation]. *Ekonomicheskaya politika* [Economic policy]. 2019, vol. 14, Iss. 4, pp. 194–219. (In Russian)  
Novyy Preyskurant № 10-01 ili novaya sistema gosudarstvennogo regulirovaniya (O neobkhodimosti sistemnogo podkhoda v reshenii otraslevykh problem) [New Price List № 10-01 or a new system of state regulation (On the need for a systematic approach to solving industry problems)]? *Byulleten' transportnoy informatsii* [Transport Information Bulletin]. 2018, Iss. 1(271), pp. 4–11. (In Russian)
8. Gulyi I. M. Vliyaniye tsifrovoy transformatsii na strukturu sebestoimosti transportnykh uslug [Influence of digital transformation on the cost structure of transport services]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2021, Iss. 4(95), pp. 16–18. (In Russian)
9. Zhuravleva N. A. Vliyaniye postpandemiynoy ekonomiki na biznes-model' transportnykh organizatsiy [Influence of the post-pandemic economy on the business model of transport organizations]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2020, Iss. 3-4(88-89), pp. 20–23. (In Russian)
10. Volkova E. M. Vliyaniye logisticheskikh zatrat na finansovyye pokazateli raboty kompanii [Influence of logistics costs on the financial performance of the company]. *Logistika i upravleniye tsepyami postavok* [Logistics and supply chain management]. 2018, Iss. 5(88), pp. 53–61. (In Russian)
11. *Indeksy tarifov na gruzovye perevozki. Dannye Rosstat* [Indices of tariffs for freight transportation. Rosstat data]. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/31076> (accessed: August 15, 2023). (In Russian)
12. *Ob'em pogruzki osnovnykh vidov gruzov na zhelezнодорожном transporte (s 2005 g.). Dannye Rosstat* [The volume of loading of the main types of cargo in railway transport (since 2005). Rosstat data]. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/31076> (accessed: August 15, 2023). (In Russian)
13. *Postanovlenie FEK RF (Federal'noy energeticheskoy komissii RF) ot 17 iyunya 2003 g. № 47-t/5 "Ob utverzhdenii Preyskuranta № 10-01 "Tarify na perevozki gruzov i uslugi infrastruktury, vypolnyaemye rossiyskimi zheleznyimi dorogami" (Tarifnoe rukovodstvo № 1, chasti 1 i 2)" (s izmeneniyami i dopolneniyami)* [Decree of the Federal Energy Commission of the Russian Federation (Federal Energy Commission of the Russian Federation) dated June 17, 2003 № 47-t / 5 "On Approval of the Price List № 10-01 "Tariffs for the Transportation of Goods and Infrastructure Services Performed by Russian Railways" (Tariff Guide № 1, part 1 and 2)" (with amendments and additions). Available at: <https://base.garant.ru/12131790/> (accessed: August 15, 2023). (In Russian)

14. *Obzor raboty gruzovogo zheleznodorozhnogo transporta za 12 mesyatsev 2022 g. Analitika Soyuz operatorov zheleznodorozhnogo transporta* [Overview of the work of freight rail transport for 12 months of 2022. Analytics of the Union of Railway Transport Operators]. Available at: <http://www.railsovet.ru/analytics/obzor/> (accessed: August 15, 2023). (In Russian)

15. *Obzor raboty gruzovogo zheleznodorozhnogo transporta. Itogi 2019 goda. Analitika Soyuz operatorov zheleznodorozhnogo transporta* [Review of the work of freight rail transport. Results of 2019. Analytics of the Union of Railway Transport Operators]. Available at: <http://www.railsovet.ru/analytics/obzor/> (accessed: August 15, 2023). (In Russian)

Received: July 29, 2023

Accepted: August 28, 2023

**Author's information:**

Yuriy V. EGOROV — PhD in Engineering, Associate Professor; [orion56@mail.ru](mailto:orion56@mail.ru)

---

## ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 628.14

### Анализ процессов теплообмена на поверхности надземного трубопровода с теплоизоляцией

**В. Ф. Лапшин**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Лапшин В. Ф.* Анализ процессов теплообмена на поверхности надземного трубопровода с теплоизоляцией // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 147–156. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-147-156

#### Аннотация

**Цель:** Объекты транспортной инфраструктуры включают в себя разнообразные системы водоснабжения. В условиях отрицательных температур окружающей среды возникает опасность замерзания и разрушения водоводов. При математическом моделировании работы надземных трубопроводов большое значение имеет правильное описание процесса теплообмена между наружной стенкой трубопровода и окружающей атмосферой. Граничное условие, соответствующее этому процессу, традиционно включает в себя коэффициент теплопередачи, зависящий от ряда непредсказуемых параметров (скорости и направления ветра, давления атмосферы, влажности воздуха). Цель настоящей работы состоит в проведении сравнительного анализа роли свободного и вынужденного конвективного теплообмена и обосновании возможности постановки граничного условия, зависящего только от температуры наружного воздуха. **Методы:** Для решения поставленной задачи в работе используется численный анализ критериев подобия для процесса теплообмена в условиях, характерных для работы надземного трубопровода с теплоизоляцией. Обоснование граничного условия на внешней поверхности трубопровода основывается на законе сохранения энергии. **Результаты:** Определены области значений параметров задачи, при которых преобладает свободный или вынужденный конвективный теплообмен. Показано, что в условиях, характерных для работы надземных водоводов, преобладает вынужденная конвекция. При этом разница между температурами внешней поверхности трубопровода с теплоизоляцией и окружающей атмосферы мала. Показано, что в этом случае в качестве граничного условия целесообразно использовать равенство температур атмосферного воздуха и поверхности трубопровода. **Практическая значимость:** Понимание механизмов теплообмена позволяет создать адекватную модель работы трубопровода в условиях отрицательных температур. Постановка более точного и простого граничного условия на поверхности водовода упрощает задачу математического моделирования. Результаты, полученные в настоящей статье, могут быть использованы при математическом моделировании трубопроводов с теплоизоляцией.

**Ключевые слова:** Надземный трубопровод, теплоизоляция, конвективный теплообмен, коэффициент теплопередачи, граничное условие, математическая модель.

## Введение

Системы водоснабжения являются важными составляющими объектов транспортной инфраструктуры. При эксплуатации водоводов надземной прокладки в условиях отрицательных температур возникает опасность их замерзания и последующего разрушения. Изучение этой важной проблемы имеет большую историю и актуально до настоящего времени [1–8]. Как известно, в случае остановки движения воды происходит ее остывание и образование льда, постепенно перекрывающего поперечное сечение трубопровода. Для правильной оценки времени промерзания необходимо решать нестационарное дифференциальное уравнение теплопроводности с учетом фазового перехода вода — лед внутри трубопровода. Важное значение для математической модели остывания и промерзания водовода имеет описание процесса теплообмена между наружной стенкой трубопровода и окружающей атмосферой. Учет этого взаимодействия осуществляется при постановке граничного условия на внешней поверхности водовода. Как известно [9], основным механизмом передачи тепла от твердой стенки к наружному воздуху является конвективный теплообмен. На этом основании, при формулировании математической модели традиционно используется граничное условие третьего рода, опирающееся на закон теплообмена Ньютона. В настоящей работе анализируется роль вынужденного и естественного конвективного теплообмена в процессе остывания водовода. Рассматривается влияние конвективного теплообмена на разность значений температур наружной стенки трубопровода, защищенного слоем теплоизоляции, и окружающей атмосферы.

### 1. Свободная и вынужденная конвекции при охлаждении трубопровода

В работе рассматривается процесс теплообмена аксиально-симметричного трубопровода надземной прокладки с окружающей атмосферой. Величина потока тепла  $q$  на границе внешней поверхности водовода и окружающей атмосферы определяется только теплопроводностью воздуха [10] и поэтому может быть вычислена с помощью закона Фурье:

$$q = -\lambda_a \left. \frac{\partial T_a}{\partial r} \right|_{r=R}, \quad (1)$$

где  $\lambda_a$  — коэффициент теплопроводности воздуха;

$T_a(r)$  — температура воздуха;

$r$  — радиальная переменная;

$R$  — внешний радиус трубопровода.

Отметим, что для непосредственного использования (1) понадобилось бы решить систему гидродинамических уравнений, описывающих конвекцию вблизи трубопровода. Такие решения получены только для небольшого числа частных случаев [11]. Чтобы упростить задачу, для расчета потока тепла, уходящего в атмосферу, используют закон теплообмена Ньютона:

$$q = \alpha (T_w - T_{ex}), \quad (2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;

$T_w$  и  $T_{ex}$  — температуры внешней поверхности водовода и окружающей атмосферы соответственно.

Значение величины  $\alpha$ , как правило, определяют экспериментально. Для того чтобы результаты отдельных измерений можно было распространить на подобные между собой процессы, их выражают через безразмерный коэффициент теплопередачи — число Нуссельта  $Nu$ :

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda_a}. \quad (3)$$

Здесь  $D = 2R$  — наружный диаметр водовода.

Число  $Nu$  определяют отдельно для вынужденной и свободной конвекции. Система гидродинамических уравнений вынужденной конвекции при поперечном обтекании трубопровода, кроме независимых переменных, содержит всего пять параметров [11]: кинематическую вязкость  $\nu$  и температуропроводность  $a$  атмосферного воздуха, скорость набегающего потока воздуха  $V$ , наружный диаметр  $D$  и характерную разность температур  $\Delta T = T_w - T_{ex}$ . Из этих параметров можно составить всего две независимые безразмерные комбинации: число Рейнольдса  $Re = VD/\nu$  и число Прандтля  $Pr = \nu/a$ . Это значит, что число Нуссельта для вынужденной конвекции  $Nu_f$  может быть функцией только двух параметров:  $Nu_f = f(Re, Pr)$ . Отметим, что для воздуха число  $Pr \approx 0,72$  [9] и слабо зависит от температуры. Для выяснения конкретного вида функции подобия  $f(Re, Pr)$  обычно проводят серию экспериментов, в которых определяют число  $Nu_f$  при различных значениях  $Re$  и  $Pr$ . Затем аппроксимируют полученную зависимость, как правило, степенными функциями. Измерению коэффициентов теплоотдачи посвящено большое число экспериментальных работ (см., например, [6, 9, 10]). Отметим, что различие используемых методик и ошибки измерений приводят к существенному разбросу значений чисел Нуссельта для одинаковых параметров  $Re$  и  $Pr$ . Так, например, в работах [6, 9, 10] для диапазона значений чисел Рейнольдса  $4 \cdot 10^4 < Re < 2 \cdot 10^5$ , характерного для обтекания воздухом надземного водовода, и  $Pr = 0,72$  приведены следующие виды функций подобия при поперечном обтекании цилиндра:

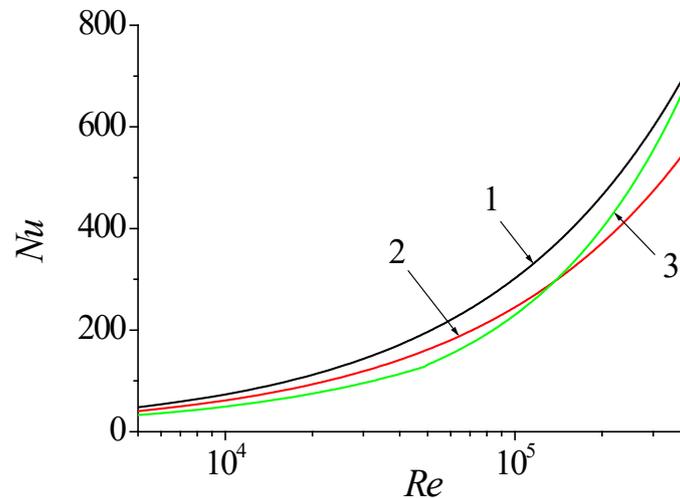


Рис. 1. Графики функции подобия  $Nu_f = f(Re)$  для вынужденной конвекции:  
1 — [6], 2 — [9], 3 — [10]

$Nu_f = 0,245Re^{0,6}$  [9],  $Nu_f = 0,023Re^{0,8}$  [10],  $Nu_f = 0,877(0,31Re^{0,5} + 0,11Re^{0,67})$  [6]. Графики этих функций приведены на рис. 1. Хорошо видно, что разница в значениях чисел Нуссельта у разных авторов составляет 20–30 %.

Система гидродинамических уравнений для свободной конвекции также содержит пять параметров [11]:  $\nu$ ,  $a$ ,  $D$ ,  $\Delta T$  и  $g\beta$ . Здесь  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>,  $\beta$  — температурный коэффициент расширения воздуха (для идеального газа  $\beta = 1/T_a$ ). Из этих параметров можно составить только две независимые безразмерные комбинации: число Рэлея  $Ra = g\beta D^3 \Delta T / \nu a$  и число Прандтля  $Pr = \nu / a$ . Приведем здесь два выражения для функции подобия  $Nu_c$ , соответствующие свободной конвекции при  $Pr = 0,72$  и  $Ra < 10^{12}$ :  $Nu_c = (0,6 + 0,3216Ra^{1/6})^2$  [6],  $Nu_c = 0,25(Ra^{0,25} + 0,27Ra^{0,333})$  [9]. Отметим, что в диапазоне значений  $10^7 < Ra < 10^9$ , характерном для свободной конвекции вокруг водовода надземной прокладки, различие между приведенными функциями невелико и составляет менее 5 %.

Для выявления роли вынужденной и свободной конвекции в теплообмене водовода с атмосферой найдем значения  $Re^* = f(Ra)$ , определяемые равенством критериев Нуссельта:

$$Nu_f(Re) = Nu_c(Ra). \quad (4)$$

На рис. 2 представлен график функции  $Re^*(Ra)$  и указаны область I ( $Re > Re^*$ ), где  $Nu_f > Nu_c$  и в теплообмене преобладает вынужденная конвекция, и область II ( $Re < Re^*$ ), где  $Nu_f < Nu_c$  и в теплообмене преобладает естественная конвекция.

Как видно из рис. 2, в области характерных для теплообмена водовода с окружающей атмосферой значений  $Ra < 10^9$  и  $Re > 4 \cdot 10^4$  преобладает вынужденный конвективный теплообмен.

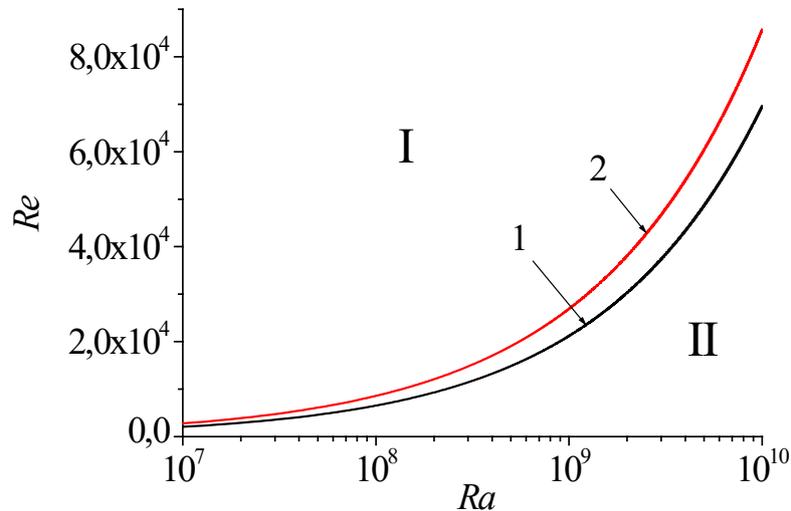


Рис. 2. График функции  $Re^*(Ra)$ , удовлетворяющей равенству критериев Нуссельта (4): I — область преобладания вынужденной конвекции, II — область преобладания свободной конвекции в теплообмене. Значения  $Re^*$  рассчитаны с использованием функций подобия: 1 — из [6], 2 — из [9]

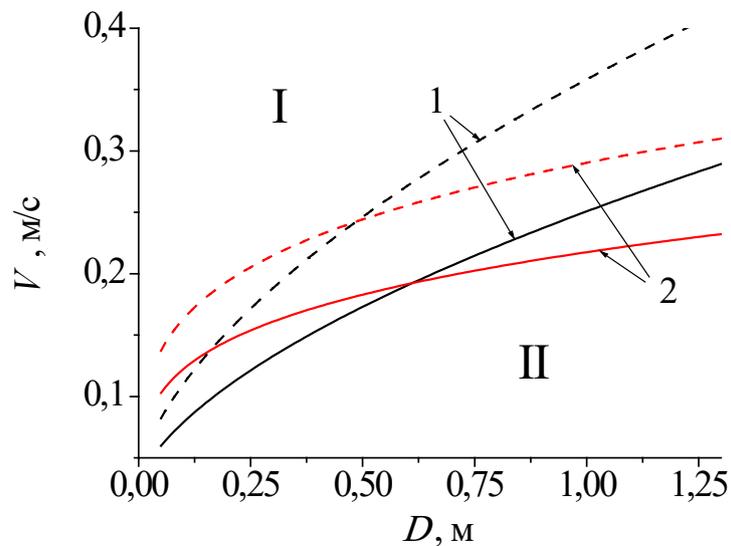


Рис. 3. График функции  $V^*(D, \Delta T)$ , удовлетворяющей равенству критериев Нуссельта (4): I — область вынужденной конвекции, II — область свободной конвекции. Значения  $V^*$  рассчитаны с использованием функций подобия: 1 — из [6], 2 — из [9]. Сплошная линия —  $\Delta T = 5^\circ C$ , пунктир —  $\Delta T = 10^\circ C$

Используя определения чисел  $Ra$  и  $Re$ , решение уравнения (4) можно представить в виде зависимостей скоростей воздуха  $V^* = f(D, \Delta T)$ . Результаты вычислений  $V^*$  представлены на рис. 3. График функции  $V^* = f(D, \Delta T)$  делит плоскость значений  $V-D$  на две области: при  $V > V^*$  в теплообмене преобладает вынужденная конвекция (область I), а при  $V < V^*$  (область II) — естественная конвекция.

Хорошо видно, что, при поперечном обтекании, уже при скорости воздуха  $V > 0,4$  м/с, основным механизмом теплообмена водовода с окружающей атмосферой является вынужденная конвекция.

## 2. Анализ граничного условия на поверхности водовода с теплоизоляцией

При математическом моделировании процессов остывания и замерзания водовода неизбежно приходится формулировать граничное условие на его внешней поверхности. Традиционно для этой цели используется закон теплообмена Ньютона (2):

$$-\lambda_i \left. \frac{\partial T_i}{\partial r} \right|_{r=R} = \alpha (T_w - T_{ex}). \quad (5)$$

Здесь  $\lambda_i$  и  $T_i(r)$  — теплопроводность и температура материала теплоизолятора,  $T_i(R) = T_w$ . Существенным недостатком соотношения (4) является значительная неопределенность в значении величины коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ . Это связано с тем, что, во-первых, имеет место разброс (до 30 %) в значениях критерия Нуссельта, рассчитанного для подобных процессов у разных авторов. Во-вторых, в случае реального остывания водовода имеется значительная неопределенность относительно таких параметров, как направление и величина скорости ветра и влажность воздуха, существенным образом влияющих на значение  $\alpha$ . Отметим здесь также, что величина  $\alpha$  может в разы изменяться вдоль периметра поперечного сечения трубопровода. Фактически в (5) входит некоторое среднее по поверхности трубопровода значение  $\alpha$ .

Оценим здесь относительную разность температур окружающей атмосферы и поверхности водовода  $\varepsilon = \Delta T / (T_0 - T_{ex})$ . Из (3) и (5) следует, что:

$$\varepsilon = \frac{\Delta T}{T_0 - T_{ex}} = \frac{D \lambda_i}{\delta \lambda_a} \frac{1}{Nu_f}, \quad (6)$$

где  $T_0$  — температура воды на оси трубопровода;  $\Delta T = T_w - T_{ex}$ ;  $\delta$  — толщина слоя теплоизоляции. Результаты расчетов величины  $\varepsilon$  для  $\lambda_i = 0,04$  Вт/(м·К) [12],  $\nu = 1,16$  м<sup>2</sup>/с,  $\lambda_a = 0,023$  Вт/(м·К) [9] приведены на рис. 4.

Хорошо видно, что для  $D < 1$  м уже при скорости ветра  $V > 0,5$  м/с отклонение температуры внешней поверхности водовода от температуры атмосферного воздуха не превышает 8 %. Это означает, что температура внешней поверхности водовода в реальных условиях близка к температуре наружного воздуха.

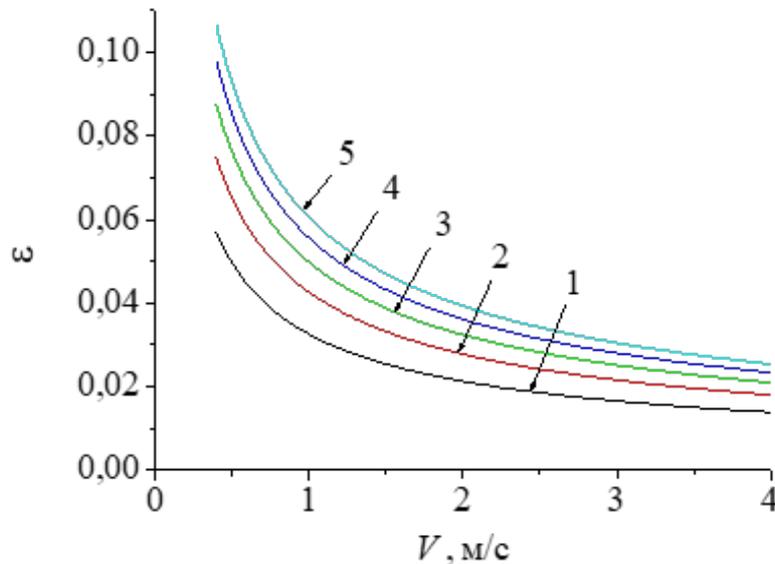


Рис. 4. Зависимость относительной разности температур  $\varepsilon$  от скорости поперечного ветра  $V$  при толщине слоя теплоизолятора  $\delta = 0,1$  м для различных значений диаметра трубопровода  $D$ :

1 — 0,2 м; 2 — 0,4 м; 3 — 0,6 м; 4 — 0,8 м; 5 — 1,0 м

Соответственно, вместо граничного условия (5) целесообразно использовать более точное и простое условие равенства температур внешней поверхности трубопровода  $T_w$  и атмосферного воздуха  $T_{ex}$ :

$$T_w = T_{ex}.$$

## Заключение

В настоящей работе выполнен анализ механизмов конвективного теплообмена водовода надземной прокладки с окружающей атмосферой. Показано, что основную роль в теплообмене играет вынужденная конвекция. При этом даже при незначительных скоростях ветра  $V \sim 1$  м/с отклонение температуры внешней поверхности водовода со слоем теплоизоляции от температуры атмосферного воздуха невелико и составляет всего несколько процентов от разности температур между водой в трубопроводе и атмосферой. Это позволяет при математическом моделировании замерзания водоводов с теплоизоляцией использовать простое граничное условие равенства температур окружающей атмосферы и поверхности трубопровода. Результаты, полученные в настоящей статье, могут быть использованы при математическом моделировании работы трубопроводов в условиях отрицательных температур.

## Библиографический список

1. Богословский П. А. Ледовый режим трубопроводов гидроэлектрических станций / П. А. Богословский. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950. — 154 с.
2. Жидких В. М. Ледовый режим трубопроводов / В. М. Жидких, Ю. А. Попов. — Л.: Энергия, 1979. — 132 с.
3. Cheng K. C. Freezing and melting heat transfer in engineering: Selected topics on ice–water systems and welding and casting processes / K. C. Cheng, N. Seki. — New York: Hemisphere, 1991. — 815 p.
4. Gordon J. R. An Investigation into Freezing and Bursting Water Pipes in Residential Construction / J. R. Gordon // Research Report, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA. — 1996. — Iss. 96-1. — Pp. 1-51. — URL: <https://www.ideals.illinois.edu/items/54859>.
5. Akyurt M. Freezing phenomena in ice–water systems / M. Akyurt, G. Zaki, B. Habeebullah // Energy Conversion and Management. — 2002. — Vol. 43. — Pp. 1773–1789.
6. McDonald A. Mathematical simulation of the freezing time of water in small diameter pipes / A. McDonald, B. Bscheiden, E. Sullivan et al. // Applied Thermal Engineering. — 2014. — Vol. 73(1). — Pp. 142–153.
7. Hongfei Xu. Modelling ice and wax formation in a pipeline in the Arctic environment / Xu Hongfei, H. Dali, S. Yue et al. // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2020. — Vol. 66. — P. 104197. — DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104197.
8. Терехов Л. Д. Внутреннее обледенение водоводов в зимний период / Л. Д. Терехов, Н. В. Твардовская, Е. А. Твардовская // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. — Т. 2. — С. 161–164.
9. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.
10. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. — М.: Атомиздат, 1979. — 416 с.
11. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М.: Наука, 1986. — 736 с.
12. ГОСТ 21880—2011. Маты из минеральной ваты прошивные теплоизоляционные / Редактор В. Н. Копысов. — М.: Стандартинформ, 2012. — 10 с.

Дата поступления: 30.06.2023

Решение о публикации: 31.07.2023

### Контактная информация:

ЛАПШИН Владимир Федорович — д-р физ.-мат. наук, проф; [lapshinvf@mail.ru](mailto:lapshinvf@mail.ru)

# Analysis of Heat Exchange Processes on the Surface of the Aboveground Pipeline with Heat Insulation

V. F. Lapshin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Lapshin V. F. Analysis of Heat Exchange Processes on the Surface of the Aboveground Pipeline with Heat Insulation. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 147–156. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-147-156

## Summary

**Purpose:** Transport infrastructure facilities include a variety of water supply systems. In the conditions of negative ambient temperatures, there is a risk of freezing and destruction of water pipelines. In mathematical modeling of the operation of aboveground pipelines, the correct description of the heat exchange process between the outer wall of the pipeline and the surrounding atmosphere is of great importance. The boundary condition corresponding to this process traditionally includes a heat transfer coefficient depending on a number of unpredictable parameters (wind speed and direction, atmospheric pressure, air humidity). The purpose of this work is to carry out a comparative analysis of the role of free and forced convective heat exchange and to justify the possibility of setting a boundary condition that depends only on the outside air temperature. **Methods:** To solve this problem, the work uses numerical analysis of similarity criteria for the heat exchange process under conditions typical for the operation of an above-ground pipeline with thermal insulation. The justification of the boundary condition on the external surface of the pipeline is based on the law of energy conservation. **Results:** The values of the parameters of the problem are determined, in which free or forced convective heat exchange prevails. It has been shown that forced convection prevails in conditions typical for the operation of above-ground water pipelines. Under these conditions, the difference between the temperature of the external surface of the insulated pipeline and the surrounding atmosphere is small. It has been shown that in this case, it is advisable to use the equality of atmospheric air temperatures and pipeline surface temperatures as a boundary condition. **Practical significance:** Understanding the mechanisms of heat exchange makes it possible to create an adequate model of the operation of pipelines in conditions of negative temperatures. Setting a more accurate and simple boundary condition on the surface of the pipeline simplifies the task of mathematical modeling. The results obtained in this article can be used in mathematical modeling of any pipelines with thermal insulation.

**Keywords:** Above-ground pipeline, heat insulation, convective heat exchange, heat transfer coefficient, boundary condition, mathematical model.

## References

1. Bogoslovskiy P. A. *Ledovyy rezhim truboprovodov gidroelektricheskikh stantsiy* [Ice regime of pipelines of hydroelectric stations]. M.; L.: Gosenergoizdat Publ., 1950, 154 p. (In Russian)
2. Zhidkikh V. M., Popov Yu. A. *Ledovyy rezhim truboprovodov* [Ice regime of pipelines]. L.: Energiya Publ., 1979, 132 p. (In Russian)
3. Cheng K. C., Seki N. *Freezing and melting heat transfer in engineering: Selected topics on ice–water systems and welding and casting processes*. New York: Hemisphere, 1991, 815 p.
4. Gordon J. R. *An Investigation into Freezing and Bursting Water Pipes in Residential Construction*. Research Report, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA, 1996, Iss. 96-1, pp. 1–51. Available at: <https://www.ideals.illinois.edu/items/54859>.

5. Akyurt M., Zaki G., Habeebullah B. Freezing phenomena in ice–water systems. *Energy Conversion and Management*, 2002, vol. 43, pp. 1773–1789.
6. McDonald A., Bscheiden B., Sullivan E. et al. Mathematical simulation of the freezing time of water in small diameter pipes. *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 73(1), pp. 142–153.
7. Hongfei Xu., Dali H., Yue S. et al. Modelling ice and wax formation in a pipeline in the Arctic environment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, vol. 66, p. 104197. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104197.
8. Terekhov L. D., Tvardovskaya N. V., Tvardovskaya E. A. *Vnutrennee obledenenie vodovodov v zimniy period III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov, Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrya 2021 goda* [Internal icing of water pipelines in winter. III Betancourt International Engineering Forum: collection of proceedings, St. Petersburg, December 2–3 2021]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2021, vol. 2, pp. 161–164.
9. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow: Energiya Publ., 1977, 344 p. (In Russian)
10. Kutateladze S. S., Lifshits E. M. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Moscow: Atomizdat Publ., 1979, 416 p. (In Russian)
11. Landau L. D. *Teoreticheskaya fizika. T. VI. Gidrodinamika* [Theoretical physics. T. VI. Hydrodynamics]. Moscow: Nauka Publ., 1986, 736 p. (In Russian)
12. *GOST 21880—2011. Maty iz mineral'noy vaty proshivnye teploizolyatsionnye. Redaktor V. N. Kopysov* [GOST 21880—2011. Heat-insulating pierced mineral wool mats. Editor V. N. Kopysov]. Moscow: Standartinform Publ., 2012, 10 p. (In Russian)

Received: June 30, 2023

Accepted: July 31, 2023

**Author's information:**

Vladimir F. LAPSHIN — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor; lapshinvf@mail.ru

УДК 656.2:658.5

## Маркетинговое исследование логистики железнодорожной перевозки грузов в съемных кузовах

Ю. П. Бороненко, О. Д. Покровская, Т. С. Титова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Бороненко Ю. П., Покровская О. Д., Титова Т. С. Маркетинговое исследование логистики железнодорожной перевозки грузов в съемных кузовах // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 157–172. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-157-172

### Аннотация

**Цель:** Составить портрет потенциального потребителя и целевой образ нового транспортно-логистического продукта — железнодорожной перевозки грузов в съемных кузовах. **Методы:** Используются маркетинговые инструменты анкетирования, статистической обработки и визуализации результатов. **Результаты исследования:** По результатам работы была сформулирована концепция транспортно-логистического продукта с атрибутами, отвечающими запросам целевого потенциального потребителя. **Практическая значимость:** Выявлен перечень ключевых параметров железнодорожного вагона для перевозки съемных кузовов, собственно съемных кузовов, а также дополнительного сервиса, принципиально важных для потенциального потребителя. Результаты будут применены при выходе новой конструкции на рынок, а также при «запуске» транспортно-логистического сервиса при перевозке грузов в съемных кузовах по железным дорогам.

**Ключевые слова:** Железнодорожные перевозки, съемные кузова, новый транспортно-логистический продукт, маркетинговое исследование, потенциальный потребитель.

### Введение

Трендом грузовых железнодорожных перевозок в последнее время становится активное применение подвижного состава со съемными кузовами, обладающими более высокими технико-эксплуатационными характеристиками, чем, например, контейнеры, по таким параметрам, как грузоподъемность, погонная нагрузка, объем и др.

Известна практика стран Евросоюза по организации ролкерной (накатной) перевозки без использования кранового оборудования на основе технологии горизонтальной перегрузки, основу которой составляют съемные кузова — (так называемые *swar bodies*). Это позволяет экономить порядка 40 % энергетических расходов и увеличить производительность [1].

Съемный кузов обладает невысокой себестоимостью и обеспечивает возможность не только временного хранения грузов в кузове, но и достаточно быструю перегрузку на автомобильный транспорт, что, в свою очередь, позволит ускорить и перегрузку грузов в международных пунктах пропуска. Использование съемных кузовов обеспечивает сокращение расходов на приобретение и содержание подвижного состава [2].

Задачи по разработке конструкции грузовых вагонов нового поколения определены Стратегией развития транспортного машиностроения РФ до 2030 года [3] и закреплены в Сводной стратегии развития обрабатывающей промышленности РФ до 2024 года [4].

Достижение указанных задач невозможно без соответствующего анализа целевого сегмента рынка, что, в свою очередь, является драйвером к развитию инновационных конструктивных решений (например, в развитие предложений [5, 6]) и механизмов совершенствования транспортно-логистического сервиса при организации перевозок в съемных кузовах.

Для уточнения требований и ожиданий потенциального потребителя железнодорожной перевозки грузов в съемных кузовах было проведено маркетинговое исследование, позволяющее сформировать целевой образ нового транспортно-логистического продукта.

Целью данного исследования является составить портрет потенциального потребителя и целевой образ нового транспортно-логистического продукта — железнодорожной перевозки грузов в съемных кузовах. Используются маркетинговые инструменты анкетирования, статистической обработки и визуализации результатов.

В работе использованы аналитические материалы, изложенные в работах [7, 8], и материалы электронных ресурсов [9, 10].

Описание методики исследования

Исследование выполнялось методом анкетирования потребителей и оценки вариантов технических решений применительно к конструкции крытого вагона или съемного кузова для перевозки сборных грузов в несколько этапов:

Этап 1 — подготовительный (1 мес.):

1. Подготовка материалов анкет, предварительный список рассылки, предварительная группировка респондентов.

2. Уточнение целевой группы анкетирования: респонденты-потребители, подготовка и согласование с заказчиком вопросов анкет и перечня анкетизируемых.

Этап 2 — маркетинговый (1 мес.):

3. Анкетирование респондентов по целевым группам, рассылка материалов анкет и приложений к ним, разъяснение технико-эксплуатационных особенностей съемного кузова и подвижного состава.

4. Сбор и ранжирование полученных ответов, систематизация предварительных результатов в виде сравнительных таблиц.

5. Промежуточный анализ и визуализация полученных результатов.

Этап 3 — аналитический (1 мес.):

6. Ранжирование предпочтений потребителей.

7. Оценка клиентоориентированности предлагаемых технических и коммерческих решений.

8. Составление портрета потребителя.

9. Формулирование выводов и рекомендаций по проведенному исследованию.

10. Подготовка и оформление научно-технического отчета по исследованию.

Была выполнена веерная рассылка анкет-опросников (70 ед.), по полученным результатам (64 ед., из них 28 ед. — анонимное участие) проведено исследование. Респонденты сгруппированы следующим образом: О — операторы подвижного состава, Э — эксперты, ГО — грузоотправители, ГП — грузополучатели.

Анализ проводился по каждому вопросу из 88 вопросов анкеты-опросника, с последующим результирующим анализом согласно задачам проведенного исследования.

Вопросы анкеты-опросника сгруппированы на следующие блоки:

1 — «Рынок и портрет потребителя»;

2 — «Анализ вариантов технического исполнения съемного кузова и подвижного состава»;

3 — «Перечень требований к инфраструктуре»;

4 — «Перечень требований к сервису»;

5 — «Анализ платежеспособного спроса».

Портрет потребителя и целевой образ продукта

Рассмотрим далее полученные ответы и дадим их аналитическую оценку.

На вопрос «Какие направления международной доставки грузов, на Ваш взгляд, будут востребованы для парка съемных кузовов?» были получены следующие ответы (рис. 1).

Наиболее распространенным является вариант, данный 15 грузополучателями (ГП), — «страны Азии — Россия», а также вариант «страны Азии — Россия — Евросоюз», данный 11 операторами (О).

Вариант собственного ответа — «по России» — получен от респондентов типа «оператор» и «грузоотправитель», их можно объединить с еще одним вариантом: «внутренние перевозки грузовладельца и его дочерней операторской компании», что отвечает условиям современного отечественного транспортно-логистического рынка.

Два одинаковых ответа получены и по варианту «внутрироссийские, Евросоюз — в перспективе», которые дали респонденты типа «грузоотправитель» и «оператор», что также соответствует текущей геополитической ситуации.

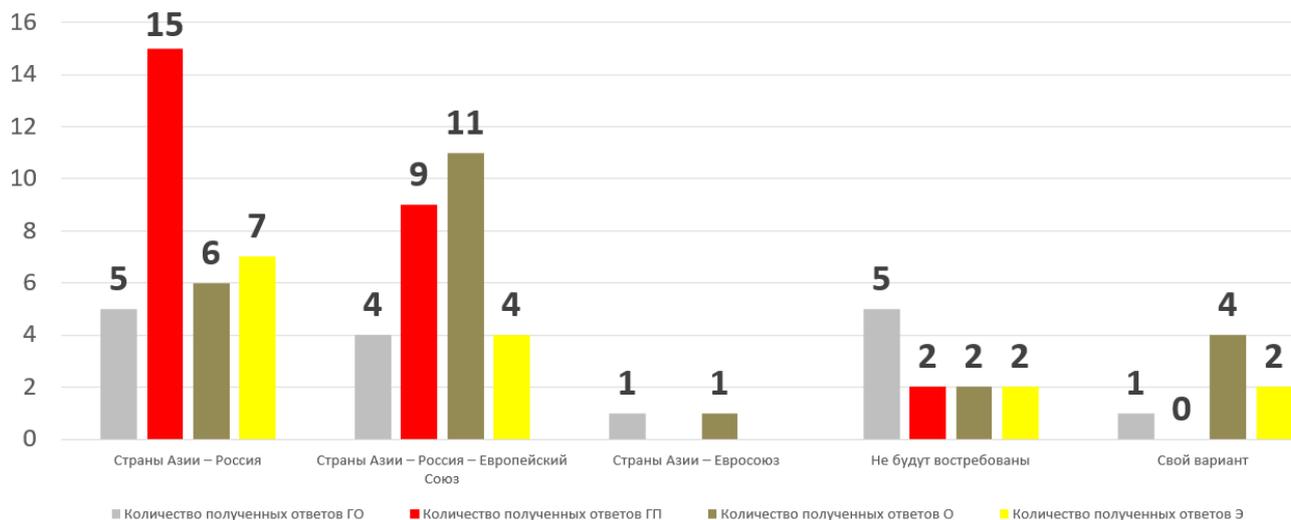


Рис. 1. Распределение полученных ответов по направлениям международной доставки



Рис. 2. Распределение полученных ответов по генеральным направлениям внутри России

В целом можно заключить, что вариант доставки в настоящее время «внутри России» является действительно соответствующим современным условиям. Вариант по маршруту «страны Азии — Россия» с продлением до Евросоюза является наиболее приемлемым для анкетированной аудитории в ближайшей перспективе.

На вопрос «На каком генеральном направлении внутри России, на Ваш взгляд, могут быть востребованы съемные кузова?» получены следующие ответы (рис. 2).

Как видно по рис. 2, наиболее распространенным является вариант «Северо-Западный регион (порты Балтийского моря) — Центральный регион (Москва) — Южный регион (порты Черного и Каспийского морей)», такой ответ дали 29 респондентов, это большинство грузополучателей и экспертов, вариант находится на втором месте по популярности и среди грузоотправителей.

На втором по популярности месте находится вариант ответа «Северо-Западный регион (порты Балтийского моря) — Центральный регион (Москва) — Урал», так ответили 23 респондента, этот вариант лидирует среди респондентов типа «оператор».

И на третьем по популярности месте находится вариант ответа «Северо-Западный регион (порты Балтийского моря) — Центральный регион (Москва) — Дальний Восток», так ответил 21 респондент, этот ответ лидирует у респондентов типа «грузоотправитель».

Собственные ответы дали все респонденты, кроме типа «грузополучатель». Среди них заслуживает внимания вариант ответа «из точек зарождения экспортных грузов до портов и погранпереходов, из портов до точек потребления продукции», он объединяет варианты «Центр — Юг, центр — Северо-Запад, Сибирь — Юг», «Сибирь — Дальний Восток» и «порты Дальнего Востока — северо-восточные и арктические регионы Дальнего Востока». 57 % собственных ответов — за вариант «из точек зарождения экспортных грузов до портов и погранпереходов, из портов до точек потребления продукции», с учетом описанной выше комбинации маршрутов.

При ответе на вопрос «Какой может быть логистическая цепь с применением съемных кузовов?» получена следующая картина (рис. 3).

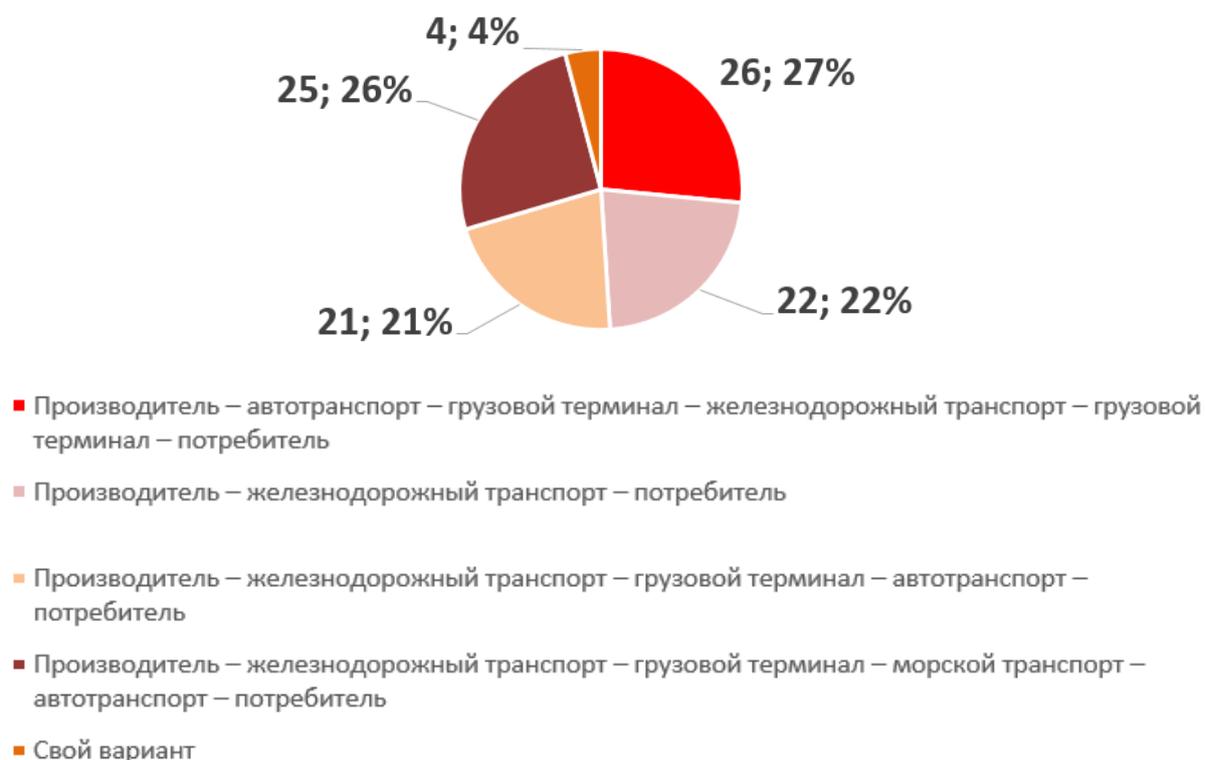


Рис. 3. Интегрированная оценка ответов

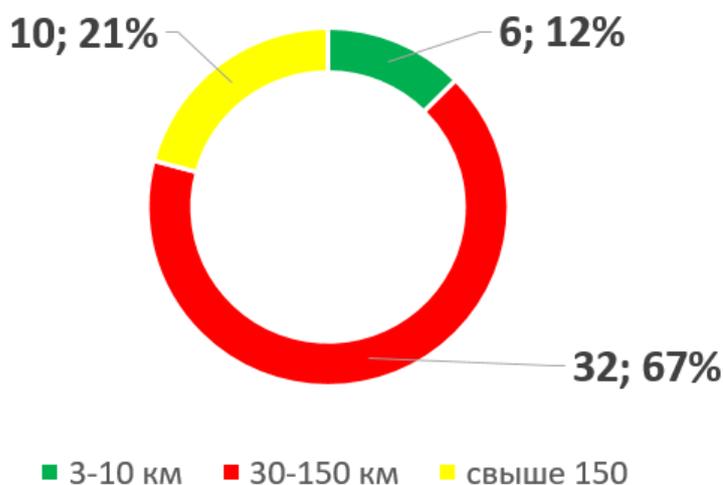


Рис. 4. Результаты укрупненной оценки ответов

Как видно по рис. 3, 27 % ответов — за вариант «производитель — автотранспорт — грузовой терминал — железнодорожный транспорт — грузовой терминал — потребитель».

Интегрированная оценка ответов респондентов о средней дальности автомобильной перевозки показала, что средняя дальность составляет порядка 30–80 км (это 46 % аудитории). Другая часть анкетированных указывает среднюю дальность 150 км и выше (это 42 % аудитории). Как видно по рис. 4, наибольшее число ответов дано в пределах от 30 до 150 км. Это расстояние соответствует так называемой «золотой миле» доставки, и в современных условиях переориентации грузопотоков оно увеличилось. Можно полагать, что на рынке имеется спрос на среднюю дальность автомобильной доставки 30–150 км. Этот рынок потенциально может быть «переключен» на работу со съемными кузовами.

По ответам на вопрос «Включаете ли Вы в работу Вашей логистической цепи посредников (автоперевозчики, складские операторы, операторы подвижного состава)?» установлено, что подавляющее большинство (79 % респондентов) использует услуги посредников при организации доставки продукции, построении цепей поставок.

Надо полагать, что при выходе на рынок потенциальной нишей может стать не только собственно производство и продажа съемных кузовов, но и управление ими, т. е. логистика полного цикла, например, на условиях аутсорсинга или провайдинга.

На вопрос «Для перевозки каких грузов, на Ваш взгляд, интересен способ доставки в съемных кузовах (отметить несколько)?» получены следующие ответы (рис. 5).

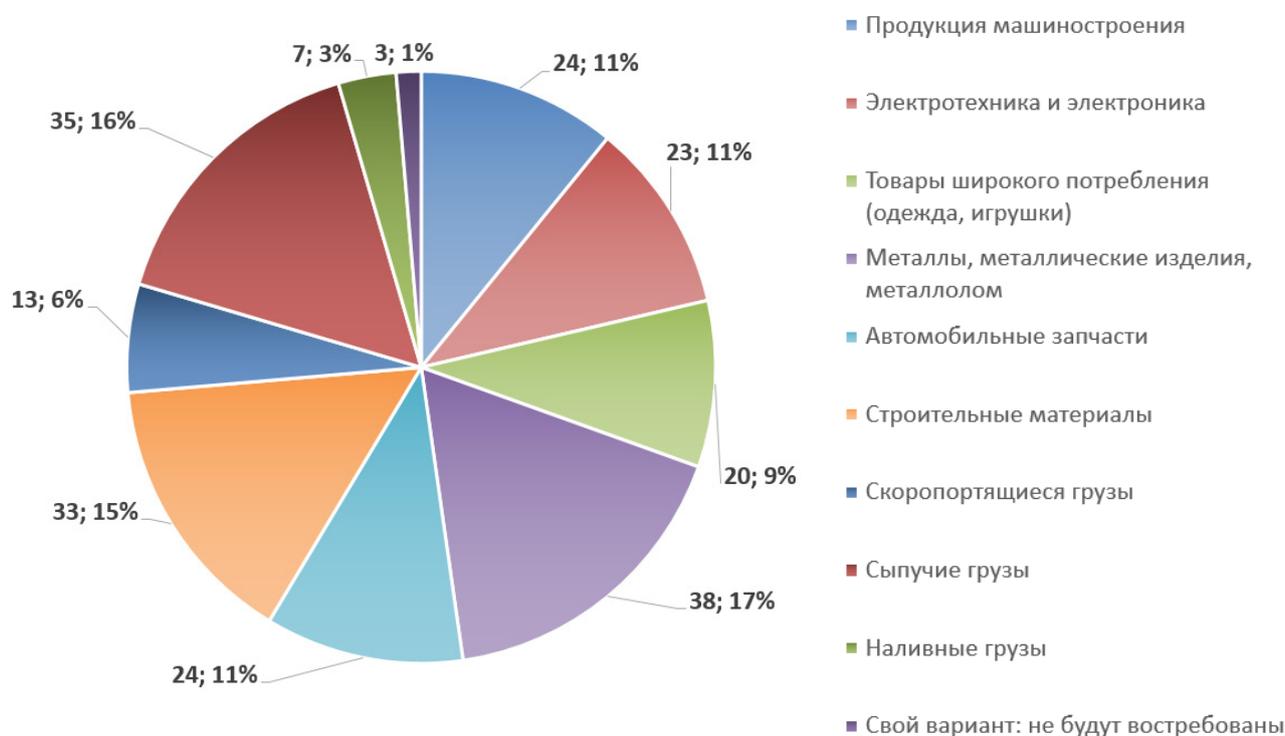


Рис. 5. Распределение полученных ответов по потенциальной номенклатуре грузов для съемных кузовов (группировка по типу грузов)

Как видно по рис. 5, грузополучатели в основном указывают такие грузы, как металлы и металлические изделия (1-е место по популярности), строительные материалы, сыпучие грузы, продукцию машиностроения.

Грузоотправители указывали такие потенциально пригодные к перевозке в съемных кузовах грузы, как металлы и металлические изделия (1-е место по популярности), сыпучие грузы, электротехника и электроника.

Среди операторов популярны были ответы: сыпучие грузы (1-е место по популярности), строительные материалы, автомобильные запчасти.

Среди экспертов популярные ответы: сыпучие грузы и металлы (делят 1-е место по популярности), затем строительные материалы и автомобильные запчасти (делят 2-е место по популярности).

Таким образом, металлы и металлические изделия, строительные материалы и сыпучие грузы преобладают в ответах всех респондентов.

В анкете респондентам было предложено отметить на карте (рис. 6) параметры, которые обязательно должны отражать различные варианты системы бортовой телеметрии съемного кузова. На рис. 6 показано количество полученных ответов по каждой из трех версий предполагаемого исполнения системы бортовой телеметрии.

ПАРАМЕТРЫ	БАЗОВАЯ	РАСШИРЕННАЯ	МАКСИМАЛЬНАЯ
Уменьшение/увеличение температуры в вагоне сверх нормативного	20	13	10
Уменьшение/увеличение температуры груза сверх нормативного	18	21	9
<b>Наличие и сохранность ЗПУ</b>	35	10	22
Контроль внешних воздействий (удары, толчки)	21	20	14
Контроль несанкционированного открытия дверей/люков	18	14	22
Сохранность запорно-пломбировочных устройств	24	20	13
GSM- определение местоположения вагона с обратной GPS-связью	20	11	18
Определение скорости движения	17	20	9
Определение температуры окружающей среды	22	3	11
Сверхнормативная нагрузка	36	20	9
<b>Ваш вариант опционального параметра:</b>		2	
<b>ДЛЯ ГРУЗА:</b>			
Уменьшение/увеличение температуры в кузове сверх нормативного	21	13	16
Уменьшение/увеличение температуры груза сверх нормативного	15	11	16
Сохранность запорно-пломбировочных устройств	21	11	12
Определение уровня воздействия на груз ускорений (по их видам)	25	17	9
<b>Ваш вариант опционального параметра:</b>		1	1

Рис. 6. Карта оценки важности контролируемых параметров

Респонденты отмечают следующую «базовую версию» контролируемых телеметрией параметров груза:

- сохранность запорно-пломбировочных устройств;
- определение уровня воздействия на груз ускорений (по их видам).

Расширенную версию контролируемых телеметрией параметров съемного кузова:

«Базовая версия +»:

– уменьшение/увеличение температуры в кузове сверх нормативной.

Максимальную версию контролируемых телеметрией параметров съемного кузова:

«Расширенная версия+»:

– уменьшение/увеличение температуры груза сверх нормативной.

Версии составлены по двум параметрам, которые указали максимальное количество респондентов. Указанные версии можно рекомендовать при выходе на рынок и подготовке «линейки» различных технических исполнений (компоновки) съемных кузовов.

Рассмотрим распределение важности параметров для респондентов.

На первом месте по важности для респондентов находятся в равных долях (по 13 %) два параметра съемного кузова для контроля системой бортовой телеметрии: «наличие и сохранность ЗПУ» и «сверхнормативная нагрузка». Второе место делят два параметра: «сохранность ЗПУ» и «контроль внешних воздействий (удары, толчки)». На третьем по важности месте находится параметр «контроль несанкционированного открытия дверей/люков».

По результатам интегрированной оценки важности параметров предлагается:

– для контроля системой бортовой телеметрии параметров съемного кузова рекомендуется в базовую версию оснащения съемного кузова включить параметр «наличие и сохранность ЗПУ»;

– для контроля системой бортовой телеметрии параметров съемного кузова рекомендуется в расширенную версию оснащения съемного кузова включить два ключевых параметра: «сверхнормативная нагрузка», «контроль внешних воздействий (удары, толчки)»;

– для контроля системой бортовой телеметрии параметров груза рекомендуется в максимальную версию оснащения съемного кузова включить два параметра: «уменьшение/увеличение температуры в кузове сверх нормативной» и «определение уровня воздействия на груз ускорений (по их видам)».

При ответе на вопрос «Какой параметр (только один), обеспечиваемый конструкцией съемного кузова, наиболее важен для Вас?» получена следующая картина (рис. 7):

Как видно по рис. 7, наиболее распространенным среди грузоотправителей, операторов и экспертов является вариант «удобство погрузки-выгрузки», среди грузополучателей — «увеличенная грузоподъемность».

Среди собственных вариантов ответа оба заслуживают внимания: это отмеченный экспертом ответ «универсальность погрузки/выгрузки, складирования» и отмеченный оператором ответ «сокращение порожних непроизводительных рейсов».

Рекомендуется учесть параметр «увеличенная грузоподъемность», отмеченный тремя группами респондентов, в «запуске» съемных кузовов на рынок при проведении маркетинговых кампаний как ключевого параметра.



Рис. 7. Распределение полученных ответов по приоритетному параметру для конструкции съемного кузова

В рекламе съемных кузовов следует ориентироваться на такие ответы, как «универсальность погрузки/выгрузки, складирования» и «сокращение порожних непроизводительных рейсов».

Параметр «увеличенная грузоподъемность» является, как показало исследование, критичным для большинства аудитории, что следует учесть при дальнейших конструкторских работах и в комплектации съемных кузовов.

При ответе на вопрос «Какими устройствами и системами, на Ваш взгляд, должен быть оборудован вагон для перевозки съемных кузовов (выбрать несколько вариантов)?» получена картина, показанная на рис. 8.

Укрупненная оценка результатов показала, что 24 % аудитории за вариант «скоростная тележка, позволяющая повысить скорость движения более 90 км/час». На втором месте — вариант «наличие нескольких грузовых отсеков». На третьем — «поглощающие аппараты, снижающие нагрузки при соударениях вагонов».

При распределении ответов на вопрос «Расставьте, пожалуйста, качественные параметры вагона в порядке убывания приоритета для Вас (от 1 — наиболее важного к 4 — наименее важному)» получены следующие результаты (рис. 9):

Как видно по рис. 9, глазами респондентов приоритеты выглядят так:

- сохранность груза;
- скорость доставки;
- быстрота и удобство выполнения погрузочно-разгрузочных работ;
- надежность и ремонтпригодность элементов вагона в целом;
- онлайн-мониторинг дислокации и состояния груза и вагона.

Ключевой проблемой респонденты назвали сложность грузовых операций, а также отсутствие терминально-логистической инфраструктуры.



Рис. 8. Интегрированная оценка полученных ответов

«Узким местом» в расширенном применении съемных кузовов, очевидно, при «переключении» грузопотоков с автомобильного транспорта на железнодорожный может стать применимость съемного кузова для «дорожного» автомобильного транспорта, допускаемого к эксплуатации по автомобильным дорогам общего пользования. Это связано с таким техническим параметром съемного кузова, как его ширина (более 2,55 м), что превышает допустимую ширину автотранспортного средства согласно Правилам дорожного движения.

К технико-эксплуатационным сложностям респонденты относят «снижение грузоподъемности вагона», «наличие устройств подъема», а также «отсутствие отработанной технологии погрузки-выгрузки съемных кузовов» и «особенности крепления» (сложность в их универсальности). В сложившихся геополитических условиях заслуживает особого внимания техническое обслуживание и ремонт в случае применения импортных комплектующих.

Таким образом, на основе анализа ответов респондентов составлен портрет типичного (потенциального) потребителя.

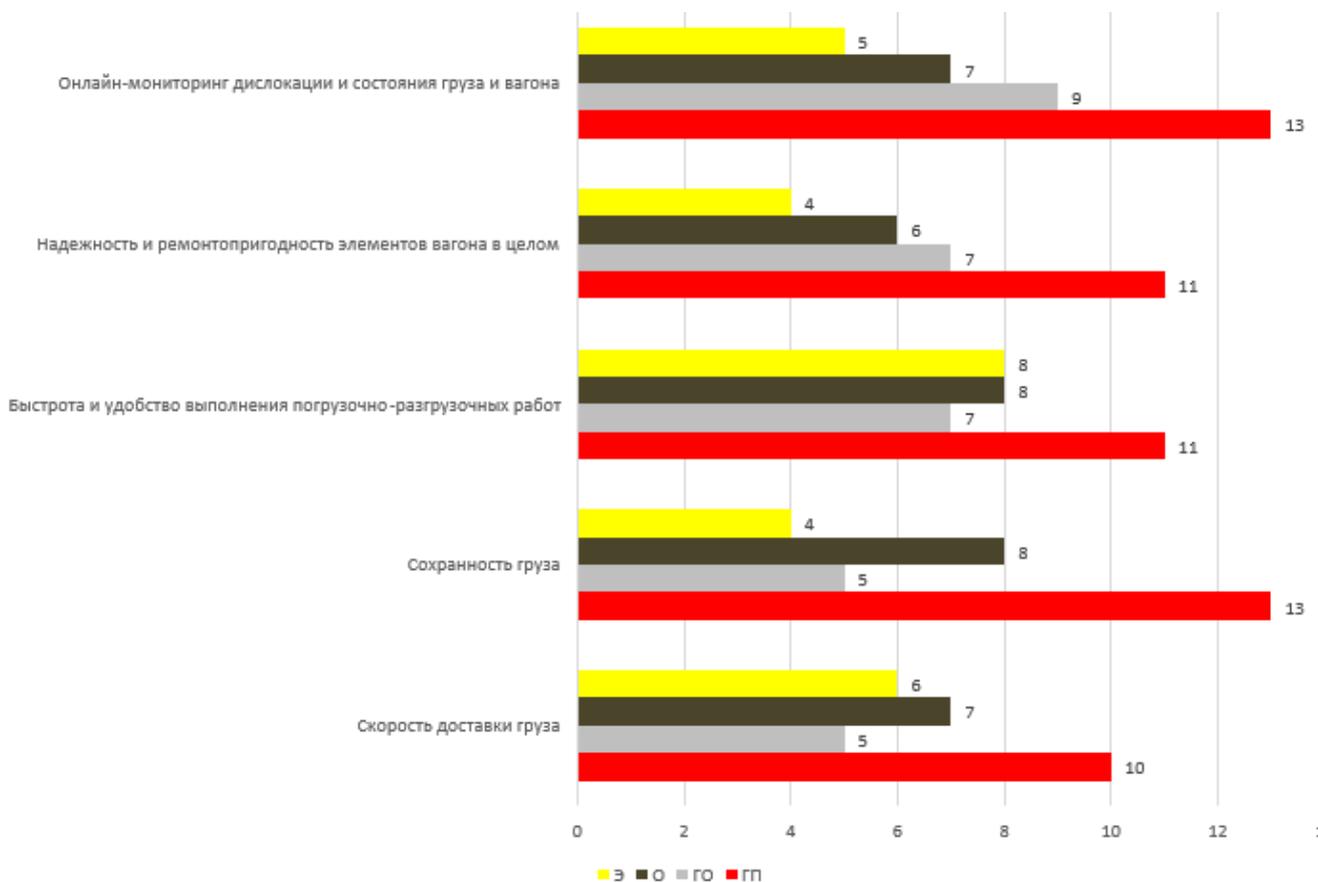


Рис. 9. Интегрированная оценка ответов

Целевой фокусный сегмент рынка: производственная компания-грузополучатель, осуществляющий работу с полувагонами, платформами, крытыми вагонами и хопперами, с аутсорсингом логистических операций, расположенный на удалении от 30 до 150 км от железнодорожной станции, работающий с металлами и металлическими изделиями, строительными материалами и сыпучими грузами, имеющий собственные грузовые фронты и складские помещения.

Масштабы бизнеса целевого сегмента — Россия (в целом) и (или) Россия — страны СНГ.

Приоритеты для целевого сегмента (можно рассматривать их как акценты рекламной кампании и обязательные атрибуты транспортного продукта) — сохранность груза, отсутствие сверхнормативной загрузки и повышенная грузоподъемность вагона, высокая скорость доставки, удобство выполнения погрузочно-разгрузочных работ, простота и удобство обмена съемными кузовами, возможность хранения груза в съемном кузове, возможность отправки день в день и комплексное логистическое обслуживание перевозки, надежность и ремонтпригодность элементов вагона в целом, онлайн-мониторинг дислокации и состояния груза и вагона.

## Заключение

По итогам полученных при анкетировании ответов респондентов и интегрированной оценки был сформирован перечень клиентских требований к съемному кузову (по сегментам аудитории).

Практическое значение полученных результатов заключается в возможности их применения крупными транспортно-логистическими компаниями при «выходе» на рынок в части установления опциональных линеек исполнения съемного кузова, подвижного состава для их перевозки, а также перечня и стоимости сопутствующих услуг.

Установлено, что ключевым требованием грузовладельцев является возможность перестановки съемного кузова с подвижного состава и их хранение на терминалах в ожидании разгрузки. Немаловажным является и требование обратного отправления вагона того же назначения со съемным (уже другим) кузовом. Безусловно, такая технология требует развития систем идентификации, нумерации и классификации подвижного состава (вагонов для перевозки съемных кузовов) с обеспечением быстрой перерегистрации вагонов с учетом новой комплектации. В свою очередь, подобное требование подразумевает и соответствующий уровень цифровизации учета съемных кузовов, мониторинга их технического состояния, местонахождения, комплектации, а также автоматизированного учета всех операций с ними. В дальнейшем потребуется автоматизированная система, имеющая актуальную базу данных по всем находящимся на сети железных дорог вагонам, укомплектованных для перевозки съемных кузовов, а также собственно съемным кузовам.

По результатам работы была сформулирована концепция транспортно-логистического продукта с атрибутами, отвечающими запросам целевого потенциального потребителя. Выявлен перечень ключевых параметров железнодорожного вагона для перевозки съемных кузовов, собственно съемных кузовов, а также дополнительных услуг, принципиально важных для потенциального потребителя. Результаты будут применены при выходе новой конструкции на рынок, а также при «запуске» транспортно-логистического сервиса при перевозке грузов в съемных кузовах по железным дорогам.

Надо полагать, что сформулированные в данной работе результаты станут драйвером к развитию инновационных конструкционных решений и новых механизмов совершенствования транспортно-логистического сервиса при организации перевозок в съемных кузовах.

## Библиографический список

1. Съемный кузов сократит простой вагонов // Газета «Гудок». — URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1320041&archive=2015.12.07> (дата обращения: 11.07.2023).
2. ОАО «РЖД»: Съемные кузова. — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?accessible=true&id=193854> (дата обращения: 11.07.2023)
3. Стратегия развития транспортного машиностроения РФ до 2030 года. — Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 17 августа 2017 г. № 1756-р. — 68 с. — URL: <http://static.government.ru/media/files/klnxiLOfYHPRsEe6cD9NsI0KM32LMacz.pdf> (дата обращения: 11.07.2023).
4. Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности РФ до 2024 года. — Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 6 июня 2020 г. № 1512-р. — 51 с. — URL: <http://static.government.ru/media/files/Qw77Aau6IOSEluQqYnvR4tGMCy6rv6Qm.pdf> (дата обращения: 11.07.2023).
5. Съемный кузов транспортного средства: патент на полезную модель 216101 U1 / Ю. П. Бороненко, Л. В. Цыганская, Д. Г. Бейн и др. Заявка № 2021139988 от 30.12.2021.
6. Съемный кузов-цистерна: патент на полезную модель RU 175966 U1 / Ю. П. Бороненко, А. С. Даукша. Заявка № 2017108170 от 13.03.2017.
7. Титова Т. С. Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты / Т. С. Титова, Ю. П. Бороненко, Е. Ю. Семенов // Вагоны и вагонное хозяйство. — 2022. — № 3(71). — С. 20–24.
8. Бороненко Ю. П. Метод оценки энергоэффективности грузовых вагонов / Ю. П. Бороненко // Транспорт Российской Федерации. — 2022. — № 3(100). — С. 37–39.
9. Съемные кузова: об уже достигнутых результатах и о перспективах // Время ОВК. — № 1(16), апрель 2021. — URL: [http://xn--b1aaivim16j.online/media/documents/1\\_16\\_апрель\\_2021\\_Время\\_ОВК.pdf](http://xn--b1aaivim16j.online/media/documents/1_16_апрель_2021_Время_ОВК.pdf).
10. Достойная смена. — URL: <http://xn--1520-u4d3ahgsb9pe.xn--p1ai/new/6916/> (дата обращения: 11.07.2023).

Дата поступления: 17.07.2023

Решение о публикации: 23.08.2023

### Контактная информация:

БОРОНЕНКО Юрий Павлович — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство»; boron49@yandex.ru,

ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна — д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой «Управление эксплуатационной работой»; insight1986@inbox.ru,

ТИТОВА Тамила Семеновна — д-р техн. наук, проф., первый проректор — проректор по научной работе, зав. кафедрой «Техносфера и экологическая безопасность»; titova@rgups.ru

# Marketing Research of Logistics in Railway Freight Transportation Using Swap Bodies

Yu. P. Boronenko, O. D. Pokrovskaya, T. S. Titova

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Boronenko Yu. P., Pokrovskaya O. D., Titova T. S. Marketing Research of Logistics in Railway Freight Transportation Using Swap Bodies // *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 157–172. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-157-172

## Summary

**Purpose:** To create a portrait of a potential consumer and a target image of a new transport and logistics product — railway transportation of freight in swap bodies. **Methods:** Marketing tools of questionnaires, statistical processing and visualization of results have been used. **Results:** Based on the results of the work, the concept of a transport and logistics product with attributes that meet the needs of the target potential consumer has been formulated. **Practical significance:** The list of key parameters of a railway carriage for the transportation of swap bodies, swap bodies themselves, as well as additional services, which are fundamentally important for a potential consumer, have been identified. The results will be applied when the new design enters the market, as well as when “launching” a transport and logistics service for the freight transportation in swap bodies by rail.

**Keywords:** Railway transportation, swap bodies, new transport and logistics product, marketing research, potential consumer.

## References

1. S'emnyy kuzov sokratit prostoy vagonov [A swap body will reduce the downtime of wagons]. *Gazeta "Gudok"* [Gudok newspaper]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1320041&archive=2015.12.07> (accessed: July 11, 2023). (In Russian)
2. OAO "RZhD": S'emnye kuzova [Russian Railways: Swap bodies]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?accessible=true&id=193854> (accessed: July 11, 2023). (In Russian)
3. *Strategiya razvitiya transportnogo mashinostroeniya RF do 2030 goda. Utverzhdena Rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 17 avgusta 2017 g. № 1756-r* [Strategy for the development of transport engineering in the Russian Federation until 2030. Approved by Order of the Government of the Russian Federation of August 17, 2017 № 1756-r]. 68 p. Available at: <http://static.government.ru/media/files/klnxiLOfYHPRsEe6cD9NsI0KM32LMacz.pdf> (accessed: July 11, 2023). (In Russian)
4. *Svodnaya strategiya razvitiya obrabatyvayushchey promyshlennosti RF do 2024 goda. Utverzhdena Rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 6 iyunya 2020 g. № 1512-r* [Consolidated strategy for the development of the manufacturing industry of the Russian Federation until 2024. — Approved by Order of the Government of the Russian Federation of June 6, 2020 № 1512-r]. 51 p. Available at: <http://static.government.ru/media/files/Qw77Aau6IOSEIuQqYnvR4tGMCy6rv6Qm.pdf> (accessed: July 11, 2023). (In Russian)

5. Boronenko Yu. P., Tsyganskaya L. V., Beyn D. G. et al. *S'emnyy kuzov transportnogo sredstva* [Removable vehicle body]: Patent RF, no. 2021139988, 2021. (In Russian)
6. Boronenko Yu. P., Dauksha A. S. *S'emnyy kuzov-tsisterna* [Demountable tank body]. Patent RF, no. 2017108170, 2017. (In Russian)
7. Titova T. S., Boronenko Yu. P., Semenov E. Yu. Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty [Rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects]. *Vagony i vagonnoe khozyaystvo* [Wagons and wagon facilities]. 2022, Iss. 3(71), pp. 20–24. (In Russian)
8. Boronenko Yu. P. Metod otsenki energoeffektivnosti gruzovykh vagonov [Method for assessing the energy efficiency of freight cars]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2022, Iss. 3(100), pp. 37–39. (In Russian)
9. S'emnye kuzova: ob uzhe dostignutykh rezul'tatakh i o perspektivakh [Demountable bodies: on the results already achieved and on the prospects]. *Vremya OVK* [Vremya OVK]. Iss. 1(16), aprel' 2021. Available at: [http://xn--b1aaiviml6j.online/media/documents/1\\_16\\_aprel'\\_2021\\_Vremya\\_OVK.pdf](http://xn--b1aaiviml6j.online/media/documents/1_16_aprel'_2021_Vremya_OVK.pdf). (In Russian)
10. *Dostoyrnaya smena* [Worthy change]. Available at: <http://xn--1520-u4d3ahgsb9pe.xn--p1ai/new/6916/> (accessed: July 11, 2023). (In Russian)

Received: July 17, 2023

Accepted: August 23, 2023

**Author's information:**

Yuriy P. BORONENKO — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Department “Wagons and Wagon Economy”; boron49@yandex.ru,

Oksana D. POKROVSKAYA — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Head of the Department “Operational Work Management”; insight1986@inbox.ru

Tamila S. TITOVA — Dr. Sci. in Engineering, Professor, First Vice-Rector — Vice-Rector for Scientific Work, Head of the Department “Technosphere an Environmental Safety”; titova@pgups.ru